



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ
ΣΧΟΛΗ ΝΑΥΠΗΓΩΝ ΜΗΧΑΝΟΛΟΓΩΝ ΜΗΧΑΝΙΚΩΝ
ΤΟΜΕΑΣ ΘΑΛΛΑΣΙΩΝ ΚΑΤΑΣΚΕΥΩΝ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΝΑΥΠΗΓΙΚΗΣ ΤΕΧΝΟΛΟΓΙΑΣ

ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

«Η Επίδραση της Ενέργειας Συγκόλλησης Ρομποτικών
MCAW Συγκολλήσεων στη Μικροδομή των Χαλύβων
AH 40 FCA.»

Βασίλειος Γ. Πετρόπουλος

Επιβλέπων Καθηγητής: Δημήτριος Ι. Παντελής
Καθηγητής Ε.Μ.Π.

Αθήνα, Ιούλιος 2016

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Με την ολοκλήρωση της διπλωματικής μου εργασίας θα ήθελα αρχικά να ευχαριστήσω τον καθηγητή μου, κ. Δημήτριο Ι. Παντελή, Καθηγητή του Τομέα Θαλασσίων Κατασκευών, της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών και διευθυντή του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας για την υποστήριξή του και την καθολική επίβλεψή του επί της παρούσας εργασίας.

Επίσης θα ήθελα να ευχαριστήσω τους κυρίους Χ. Ξάνθη και Α. Μαρκουλή, μέλη του τεχνικού προσωπικού του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας, για την τεχνική υποστήριξη που μου παρείχαν σε κάποια από τα κομμάτια της πειραματικής διαδικασίας της διπλωματικής εργασίας.

Θα ήθελα ακόμα, να ευχαριστήσω το προσωπικό της εταιρίας VETA S.A. για την παραχώρηση της μηχανής συγκόλλησης και του ρομποτικού βραχίονα, και ιδιαίτερα τον κ. Γ. Πουλάκη για τη συνεργασία μας στο πειραματικό κομμάτι της παρούσας διπλωματικής εργασίας.

Ιδιαίτερες ευχαριστίες, θα ήθελα να προσδώσω στον συνάδελφο Μάριο Καζασίδη, διπλωματούχο Μηχανολόγο Μηχανικό Ε.Μ.Π. και υποψήφιο διδάκτορα της Σχολής Ναυπηγών Μηχανολόγων Μηχανικών, για την αμέριστη βοήθεια και τη διαρκή συζήτηση που είχαμε γύρω από το θέμα της διπλωματικής εργασίας, την αρωγή που μου παρείχε σε καθημερινά προβλήματα που μπορεί να συναντήσει κανείς σε θέματα διπλωματικών που εμπεριέχουν πείραμα αλλά και στις συμβουλές που μου παρείχε για την επεξεργασία των πειραματικών δεδομένων.

Περίληψη

Η παρούσα διπλωματική εργασία, πραγματεύεται την μελέτης της επίδρασης της προσδιδόμενης ενέργειας συγκόλλησης στη μικροδομή και στις μικροσκληρότητες συγκολλημένων ελασμάτων, φερριτο-μπαινιτικού χάλυβα AH 40 FCA. Οι συγκολλήσεις του χάλυβα διεξήχθησαν με τη μέθοδο σωληνοειδούς ηλεκτροδίου με μεταλλική σκόνη πυρήνα, MCAW και με τη χρήση ρομποτικού βραχίονα.

Η δομή της εργασίας βασίζεται σε έξι κεφάλαια, τα τέσσερα πρώτα από τα οποία, αποτελούν τη θεωρητική προσέγγιση της διπλωματικής εργασίας, το πέμπτο κεφάλαιο περιλαμβάνει τη διεξοδική παρουσίαση της πειραματικής διαδικασίας που πραγματοποιήθηκε, την ανάλυση των αποτελεσμάτων και την παράθεση των συμπερασμάτων που εξάγονται από αυτά και το έκτο και τελευταίο κεφάλαιο αφορά στα συμπεράσματα που αντλήθηκαν από την πειραματική διαδικασία.

Το πρώτο κεφάλαιο της διπλωματικής εργασίας, περιλαμβάνει τη περιγραφή των συγκολλήσεων ηλεκτρικού τόξου με ιδιαίτερη έμφαση στις συγκολλήσεις τύπου GMAW (MIG, MAG, FCAW, MCAW), διότι η μέθοδος MCAW, με την οποία εκτελέστηκαν οι συγκολλήσεις της πειραματικής διαδικασίας, ανήκει στην οικογένεια αυτή.

Το δεύτερο κεφάλαιο, πραγματεύεται τη θεωρητική προσέγγιση των παραμενουσών τάσεων που δημιουργούνται λόγω της συγκόλλησης. Ειδικότερα, παρατίθεται μια εκτενής αναφορά στις παραμένουσες τάσεις, στο μηχανισμό δημιουργίας τους αλλά και σε διάφορες μεθόδους που χρησιμοποιούνται για τη μέτρησή τους. Τέλος αναλύεται η απαιτούμενη θεωρία και οι μαθηματικές σχέσεις που διέπουν τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στις συγκολλήσεις, με τη μέθοδο της τυφλής σπής.

Το τρίτο κεφάλαιο, αναφέρεται στα τεχνικά χαρακτηριστικά των διφασικών, φερριτομπαινιτικών χαλύβων FCA. Γίνεται ενδελεχής αναφορά σε μελέτες που καταδεικνύουν τις αναβαθμισμένες μηχανικές τους ιδιότητες, καθώς και στη χρήση τους στη Ναυπηγική Βιομηχανία.

Το τέταρτο κεφάλαιο, όντας το τελευταίο κεφάλαιο του θεωρητικού μέρους της διπλωματικής, αφορά στην βιβλιογραφική παράθεση αποτελεσμάτων πειραματικών εργασιών που έχουν γίνει και σχετίζονται με την επίδραση της ενέργειας και άλλων παραγόντων της συγκόλλησης στις ιδιότητες της μικροδομής, αλλά και στις μηχανικές ιδιότητες μετωπικών συγκολλήσεων χαλύβων.

Η πειραματική διαδικασία της διπλωματικής εργασίας, παρατίθεται στο πέμπτο κεφάλαιο του παρόντος κειμένου. Ειδικότερα καταγράφονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του προς μελέτη χάλυβα, των αναλωσίμων των συγκολλήσεων και του εξοπλισμού που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή τους. Επιλέχτηκε η διεξαγωγή τεσσάρων συγκολλήσεων, με επίπεδα ενέργειας συγκόλλησης: 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 KJ/mm. Επιπλέον αναλύονται η διαδικασία μέτρησης και τα αποτελέσματα των παραμενουσών τάσεων και των μικροσκληρομετρήσεων. Ακόμα μελετήθηκε η μικροδομή των συγκολλημένων δοκιμίων, τόσο στερεοσκοπικά όσο και με τη χρήση οπτικού και ηλεκτρονικού μικροσκοπίου.

Τέλος, το έκτο κεφάλαιο αφορά στην παράθεση των συμπερασμάτων που αντλήθηκαν από την επεξεργασία των αποτελεσμάτων.

Abstract

The present diploma thesis, concerns the effect of the Heat Input level on the microhardness and the microstructure of AH40 – FCA steel weldments. The steel plates were welded by using the robotic Metal Core Arc Welding technique.

The study consists of six chapters, the first four of which, refer to the theoretical background of the field of investigation, the fifth chapter, refers to the experimental procedure itself, as well as, to the conducted results. The conclusions of the present study are presented in the final chapter.

In the first chapter of the present study, the arc welding techniques were discussed, focused on the GMAW family, because the specimens of the experimental procedure were welded by a variant (MCAW).

The second chapter deals with the residual stresses, which are generated in weldments during the welding procedure. More specifically, it consists of an extensive report concerning the residual stresses development and the various methods for measuring them. Moreover, all the required theory and the mathematical formulas of the residual stresses measurements (by the blind hole drilling method), are set out in detail.

The third chapter refers to the technical characteristics of FCA steel, whose microstructure consists of a matrix of fine grains of ferrite and bainite. There is also a detailed reference in the mechanical properties of these steels and their use in the shipbuilding industry.

The fourth chapter, being the last of the theoretical part of the present thesis, concerns the citation of the experimental work which is related to the effect of the heat input level and other welding factors, on the properties of the microstructure of the weldments and their mechanical response.

The final chapter refers to the experimental procedure, the chemical composition and mechanical properties of the AH40 steel and the consumable electrode, the characteristics of the welding machine and the robotic arm. Four different welding conditions were chosen to implement the welding procedure with heat input from 1 to 2.5 KJ/mm. The measurement of the residual stresses was accomplished by the blind – hole drilling method (B. H. D.). Moreover, the mid-thickness and through thickness microhardness fluctuation are presented, followed by extensive stereoscopic and microscopic analysis of the weld profiles.

Finally, the sixth chapter refers to the conclusions that were conducted by the experimental procedure.

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 Συγκολλήσεις.....	1
1.1 Εισαγωγή – Ρομποτικές Συγκολλήσεις	2
1.1.1 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια	3
1.1.2 Συγκόλληση Βυθισμένου.....	6
1.1.3 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (GTAW)	8
1.2 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (GMAW)	11
1.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου GMAW	11
1.2.2 Εξοπλισμός – Διάταξη Συγκόλλησης	12
1.2.3 Αέρια Προστασίας	13
1.2.4 Μεταφορά του τηγμένου μετάλλου προσθήκης (Transfer Mode).....	17
1.2.5 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου GMAW	21
1.3 Συγκόλληση Τόξου με χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (FCAW)	22
1.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου FCAW	22
1.3.2 Ηλεκτρόδια	24
1.3.3 Αέρια Προστασίας	26
1.3.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου FCAW	28
1.3.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW	29
1.3.6 Μέθοδος συγκόλλησης με σωληνοειδή ηλεκτρόδια με μεταλλική σκόνη πυρήνα (MCAW).....	30
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου 1	33
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 Παραμένουσες Τάσεις.....	34
2.1 Εισαγωγή στις Παραμένουσες Τάσεις.....	35
2.2 Οι Παραμένουσες Τάσεις στις συγκολλήσεις	37
2.3 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων	40
2.3.1 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων.....	40
2.3.2 Μέτρηση παραμενουσών τάσεων μέσω διάνοιξης οπής	41
2.3.2.1 Η προσέγγιση της μεθόδου μέσω της θεωρίας της διαμπερούς οπής	42
2.3.2.2 Η μέθοδος της τυφλής οπής	45
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου 2	48
 ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 Διφασικοί Χάλυβες FCA	49
3.1 Εισαγωγή στους Χάλυβες FCA	50

3.1.1 Γενικά στοιχεία των χαλύβων FCA.....	50
3.1.2 Τυποποίηση χαλύβων FCA	51
3.1.3 Χημική σύσταση των χαλύβων FCA της Nippon Steel & Sumimoto Metal	51
3.1.4 Μικροδομή των χαλύβων FCA.....	52
3.1.5 Μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων FCA	53
3.2 Συμπεριφορά Χαλύβων FCA σε κόπωση.....	53
3.2.1 Εισαγωγή στην κόπωση.....	53
3.2.2 Οι χάλυβες FCA σε κόπωση.....	54
2.3 Βελτιωτικές τεχνικές κατεργασίας συγκολλήσεων τεμαχίων χάλυβα FCA.....	56
2.4 Χρήση των χαλύβων FCA στη Ναυπηγική Βιομηχανία	56
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου 3	58

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 Ανασκόπηση εργασιών σχετικών με το θέμα της Διπλωματικής Εργασίας.....	59
4.1 Επίδραση της γωνίας λοξοτομής του ελάσματος και τον ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου στη μέθοδο GMAW.....	60
4.2 Επίδραση της ενέργειας συγκόλλησης και αραίωση του βασικού μετάλλου στη μέθοδο SAW	63
BIBΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου 4	67

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 Πειραματικό Μέρος	68
5.1 Εισαγωγή	69
5.2 Υλικά του πειράματος – Προετοιμασία.....	69
5.2.1 Σύσταση του Χάλυβα – Μετάλλου Βάσης.....	69
5.2.2 Προετοιμασία Χαλύβδινων Ελασμάτων.....	70
5.2.3 Ηλεκτρόδιο, Αέριο Προστασίας, Μηχανή Συγκόλλησης και Ρομποτικός Βραχίονας	72
5.3 Διεξαγωγή των Συγκολλήσεων	78
5.4 Μέτρηση Παραμενουσών Τάσεων	83
5.4.1 Προετοιμασία της επιφάνειας – Τοποθέτηση ροζετών	83
5.4.2 Διάταξη διάνοιξης οπής.....	86
5.4.3 Παράθεση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων	88
5.5 Μακροσκοπική Παρατήρηση	93
5.6 Μελέτη Μικροσκληροτήτων	98
5.7 Παρατήρηση με τη χρήση μικροσκοπίου	109

5.7.1 Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο	110
5.7.2 Παρατήρηση στο Ηλεκτρονικό μικροσκόπιο	118
ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ Κεφαλαίου 5	121
ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6 Συμπεράσματα	122

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1^ο

Συγκολλήσεις

1.1 Εισαγωγή – Ρομποτικές Συγκολλήσεις [1], [2]

Η πιο σημαντική συνθήκη για την επιτυχημένη επίτευξη μια διαδικασίας συγκόλλησης είναι η πρόσδοση της απαιτούμενης θερμότητας προκειμένου να γίνει η ένωση των μεταλλικών τεμαχίων μέσω σύντηξης. Οι μέθοδοι συγκόλλησης που εκτελούνται όταν γίνεται εκμετάλλευση της παραπάνω συνθήκης, ονομάζονται *συγκολλήσεις τήξης*. Η παραγωγή της θερμότητας μπορεί να γίνει είτε με χημικό τρόπο, δηλαδή μέσω φλόγας και εξώθερμων αντιδράσεων, είτε μέσω δεσμών υψηλής ενέργειας (δέσμη ηλεκτρονίων, δέσμη laser), είτε με την παρουσία ηλεκτρικού τόξου.

Υπάρχουν διάφορες μέθοδοι που αξιοποιούν την θερμότητα που μπορεί να παραχθεί από την ύπαρξη ηλεκτρικού τόξου και όλες μπορούν να βρουν εφαρμογή στο επίπεδο της ναυπηγικής τεχνολογίας, σε μεγάλη ή σε μικρή κλίμακα αναλόγως τον φόρτο εργασίας που χρειάζεται για κάθε τμήμα της παραγωγικής διαδικασίας, αλλά και των δυνατοτήτων που μπορούν να προσφέρουν. Στο παρόν κεφάλαιο θα παρουσιαστούν κάποιες διαδεδομένες συγκολλήσεις τόξου, δίνοντας βάρος στη μέθοδο GMAW/FCAW/MCAW η τελευταία από τις οποίες, είναι η μέθοδος με την οποία πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των τεμαχίων που μελετώνται στην παρούσα διπλωματική εργασία.

Η σύγχρονη βιομηχανία εξαρτάται όλο και περισσότερο από τη χρήση αυτοματοποιημένων διατάξεων που ονομάζονται ρομποτικές μηχανές. Η χρήση ρομποτικών διατάξεων (ρομπότ) γίνεται όλο και περισσότερο οικονομικά συμφέρουσα διότι:

1. Οι ρομποτικές διατάξεις μπορούν να φέρουν σε πέρας βιομηχανικό έργο με τρόπο κοντά στον ανθρώπινο και με τουλάχιστον εξίσου ποιοτικό αποτέλεσμα, για πολύ μεγάλο χρονικό διάστημα.
2. Οι ρομποτικές διατάξεις παρουσιάζουν τον καλύτερο λόγο «κόστους παραγωγής» προς «όγκο παραγωγής» για μικρούς και μέσους όγκους παραγωγής.
3. Οι ρομποτικές διατάξεις είναι ευέλικτες μηχανές κυρίως λόγω της δυνατότητας επαναπρογραμματισμού τους. Είναι διατάξεις που μπορούν να προσαρμοστούν σε πολύ διαφορετικές μεταξύ τους εργασίες. Συνεπώς, οι ρομποτικές διατάξεις είναι κατάλληλες για χρήση σε εφαρμογές που απαιτούν συχνή αλλαγή εργασίας που είναι απαραίτητη προϋπόθεση για την εισαγωγή νέων προϊόντων ή την διεξαγωγή έργου με πολυσύνθετες εργασίες.

Η εισαγωγή ρομποτικών διατάξεων στις εφαρμογές συγκολλήσεων ξεκίνησε τη δεκαετία του '70 και η εφαρμογή τους περιοριζόταν σε συγκόλληση σημείου (spot welding) και σε συγκόλληση ραφής (seam welding).

Η αξία της χρήσης ρομποτικών διατάξεων στις εφαρμογές των συγκολλήσεων μπορεί να γίνει κατανοητή με ένα παράδειγμα. Η σωστή διεκπεραίωση μια συγκόλλησης με τη μέθοδο GMAW εξαρτάται από το σωστό καθορισμό των παραμέτρων της συγκόλλησης, όπως είναι η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος, η τάση του, η ταχύτητα συγκόλλησης, η έκταση του ηλεκτροδίου, το αέριο προστασίας που χρησιμοποιείται και το μήκος του ηλεκτρικού τόξου. Μια μικρή αλλαγή στην απόσταση του πιστολιού της συγκόλλησης (πυρσός συγκόλλησης) και του προς συγκόλληση τεμαχίου, μπορεί να επιφέρει μεγάλες αλλαγές στην ένταση και την τάση του ηλεκτρικού ρεύματος που τίθεται προς εφαρμογή. Η ένταση και η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος καθώς και το αέριο προστασίας επηρεάζουν τον τρόπο μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου που τελικά καθορίζει τα χαρακτηριστικά της συγκόλλησης. Επομένως μια ρομποτική διάταξη, οποία μπορεί να διατηρεί σταθερές τις παραμέτρους κίνησης του πιστολιού της συγκόλλησης και την παροχή του ηλεκτροδίου, μπορεί να εξασφαλίσει σταθερές συνθήκες συγκόλλησης, γεγονός που οδηγεί σε σωστά διεκπεραιωμένες συγκολλήσεις.

Η έρευνα στο πεδίο των ρομποτικών συγκολλήσεων ασχολείται με τις τεχνικές και επιστημονικές παραμέτρους που απαιτούνται για την προσομοίωση των ικανοτήτων ενός έμπειρου και τεχνικά καταρτισμένου συγκολλητή. Οι συγκολλήσεις ήταν για πολλά χρόνια ένα έργο που εκτελείτο αποκλειστικά από ανθρώπους και όχι από αυτοματοποιημένες διατάξεις, γιατί η σωστή διεκπεραίωσή τους περιλαμβάνει, την κατάλληλη τεχνική, την εμπειρία και την επιστημονική κατάρτιση. Οι αυτοματοποιημένες, ρομποτικές συγκολλήσεις, είναι ένα δύσκολο και απαιτητικό έργο, λόγω της διαρκώς προσαρμοζόμενης συμπεριφοράς που θα πρέπει να έχει το αυτοματοποιημένο σύστημα που τις εκτελεί (ρομπότ).

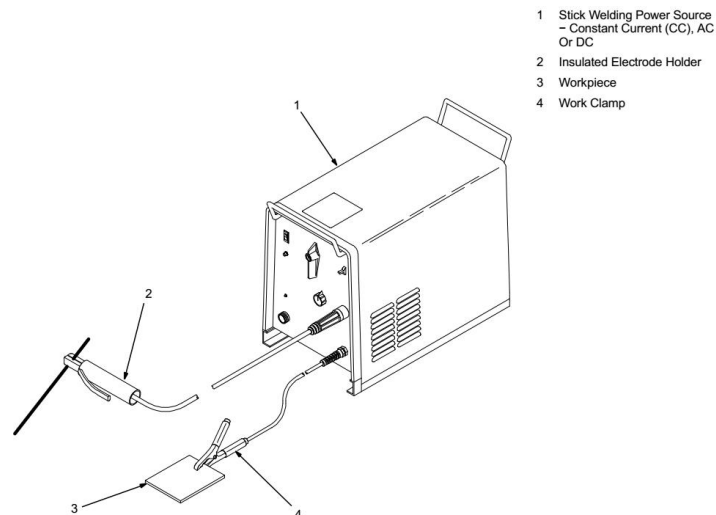
Όλες οι διαδικασίες συγκόλλησης αποτελούνται από τρεις διαφορετικές μεταξύ τους φάσεις. Η αρχική φάση της προετοιμασίας, όπου ο χειριστής της συγκόλλησης ετοιμάζει τα προς συγκόλληση δοκίμια, εισάγει και επιλέγει τις παραμέτρους της συγκόλλησης και προετοιμάζει τη διάταξη. Στη συνέχεια είναι φάση της συγκόλλησης κατά τη διάρκεια της οποίας θα πρέπει να υπάρχει έλεγχος της διαδικασίας μέσω της εποπτείας των παραμέτρων της. Και τέλος, η φάση της ανάλυσης που λαμβάνει χώρα μετά το πέρας της διαδικασίας της συγκόλλησης και στο στάδιο αυτό θα πρέπει να εξεταστεί αν η συγκόλληση που έγινε ικανοποιεί τις προϋποθέσεις που έχουν τεθεί πριν την έναρξη της διαδικασίας ή διαφορετικά θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στις προηγούμενες δύο φάσεις.

Συνεπώς, όταν σχεδιάζεται μια πλήρως αυτοματοποιημένη διάταξη συγκόλλησης (ρομπότ) θα πρέπει να λαμβάνεται υπόψη η σωστή διεκπεραίωση των τριών φάσεων που αναφέρθηκαν, έτσι ώστε να γίνονται σωστές συγκολλήσεις.

Στο πεδίο της έρευνας, αλλά και στο πεδίο της παραγωγής, ιδιαίτερα τα τελευταία χρόνια, γίνεται μεγάλη προσπάθεια να εφαρμοστεί τεχνολογία οπτικής παρατήρησης, μέσω αισθητήρων, των παραμέτρων της συγκόλλησης. Προφανώς η τεχνολογία αυτή δεν απαιτεί καμία επέμβαση του χειριστή στους οπτικούς αισθητήρες κατά τη διάρκεια της εκπόνησης της συγκόλλησης. Μέσω των αισθητήρων αυτών που είναι κάμερες υψηλής ταχύτητας και υπέρυθρης ακτινοβολίας, μπορεί να γίνει ανάλυση της δυναμικής συμπεριφοράς της λίκνης της συγκόλλησης και του τρόπου μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης από σύνθετα νευρωνικά δίκτυα και να γίνει πρόβλεψη για τα χαρακτηριστικά που έχει η λίκνη της συγκόλλησης. Η ανάλυση αυτή σε πραγματικό χρόνο μπορεί να οδηγήσει σε μεταβολή των ρυθμίσεων του ρομπότ συγκόλλησης έτσι ώστε να υπάρχει απόλυτος έλεγχος του βάθους διείσδυσης της συγκόλλησης, του πλάτους του κορδονιού επικάλυψης και της ρίζας.

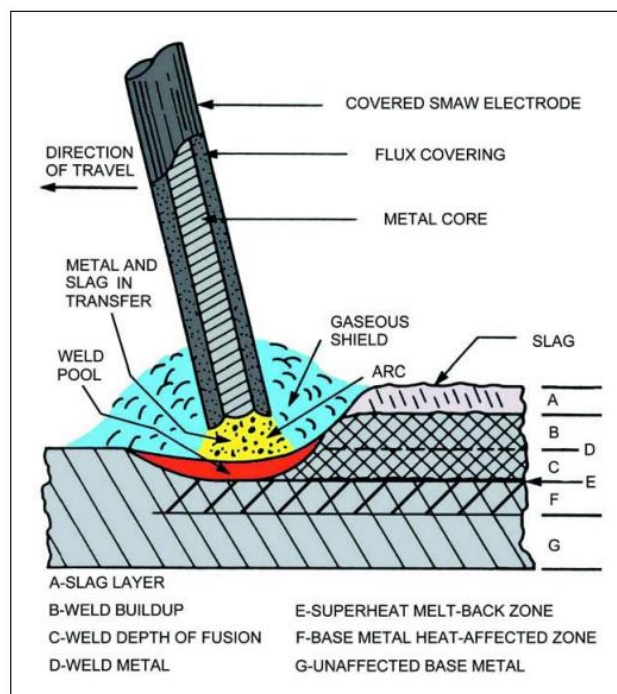
1.1.1 Συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια (Shielded Metal Arc Welding – SMAW) [3], [4]

Η πιο απλή μέθοδος συγκόλλησης τόξου είναι η μέθοδος SMAW. Η συγκόλληση με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια, γίνεται με τη βοήθεια της θερμότητας που παράγεται από το ηλεκτρικό τόξο το οποίο αποκαθίσταται μεταξύ ενός καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου και των προς συγκόλληση τεμαχίων. Κατά τη διεθνή βιβλιογραφία η μέθοδος SMAW αναφέρεται ως «stick welding». Η διάταξη της μεθόδου αυτής περιλαμβάνει μια πηγή ισχύος η οποία περιλαμβάνει δύο ακροδέκτες. Ο ένας ακροδέκτης συνδέεται με τη βάση στην οποία εγκαθίσταται το ηλεκτρόδιο και ο άλλος συνδέεται στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Η βάση του ηλεκτροδίου είναι στην ουσία ένας σφικτήρας η λαβή του οποίου είναι κατάλληλα μονωμένη για την προστασία του συγκολλητή. Η παρακάτω εικόνα δείχνει μια τυπική διάταξη της μεθόδου SMAW.



Εικόνα 1.1 Σχηματική διάταξη συγκόλλησης SMAW. Διακρίνονται: 1. Πηγή Ισχύος, 2. Λαβή - Ακροδέκτης Ηλεκτροδίου, 3. Τεμάχιο προς συγκόλληση, 4. Ακροδέκτης Τεμαχίου

Μετά την έναρξη του ηλεκτρικού τόξου, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται υπό τη μορφή σταγόνων και έτσι επιτυγχάνεται η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης στη λίμνη της συγκόλλησης. Η επένδυση των ηλεκτροδίων, λόγω της χαμηλότερης πυκνότητάς της από το τηγμένο μέταλλο ανεβαίνει στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης και στερεοποιείται με τη μορφή σκουριάς όπου και αφαιρείται. Όπως σε όλες της συγκολλήσεις τήξης έτσι και στη μέθοδο με Επενδεδυμένα Ηλεκτρόδια, οι βασικοί παράγοντες που θα πρέπει να καθορίζονται κατά τη διάρκεια της διαδικασίας της συγκόλλησης είναι η ταχύτητα της κίνησης του ηλεκτροδίου, η τάση του ηλεκτρικού τόξου και η ένταση του παρεχόμενου ρεύματος.



Εικόνα 1.2 Σχηματική παράσταση ηλεκτροδίου και λίμνης συγκόλλησης στη μέθοδο SMAW

Τα ηλεκτρόδια της μεθόδου SMAW κωδικοποιούνται κατά τον οργανισμό American Welding Society ως εξής:

E – XX Y Z

Όπου:

- Το E δείχνει ότι πρόκειται για επενδεδυμένο ηλεκτρόδιο.
- Τα ψηφία XX δείχνουν την αντοχή του μετάλλου προσθήκης σε εφελκυσμό σε μονάδες ksi.
- Το ψηφίο Y δείχνει τις θέσεις συγκόλλησης για τις οποίες είναι κατάλληλο το κάθε ηλεκτρόδιο και είναι:
 - 1 όλες οι θέσεις συγκόλλησης
 - 2 επίπεδη και μετωπική θέση
 - 3 επίπεδη θέση
- Το ψηφίο Z αναφέρεται στο είδος της επένδυσης και στις συνθήκες ηλεκτρικού ρεύματος που είναι κατάλληλες για το ηλεκτρόδιο.

Τα είδη των επενδύσεων που εφαρμόζονται στα ηλεκτρόδια της SMAW είναι επιγραμμικά τα εξής: Οργανικής επικάλυψης, Βασικής επικάλυψης, Όξινης επικάλυψης, επικάλυψης ρουτιλίου και επικάλυψης μεταλλικής σκόνης.

i. Ηλεκτρόδια με οργανική επικάλυψη

Τα ηλεκτρόδια αυτά είναι επενδεδυμένα με οργανική επικάλυψη που έχει σαν κύριο συστατικό της την κυτταρίνη (cellulose). Η θερμότητα που εκλύεται λόγω του ηλεκτρικού τόξου κατά την διάρκεια της συγκόλλησης, διασπά την κυτταρίνη και δημιουργείται ένα αέριο μίγμα που αποτελείται κυρίως από υδρογόνο, διοξείδιο και μονοξείδιο του άνθρακα και υδρατμούς. Το μίγμα αυτό απομονώνει και προστατεύει τη λίμνη της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Τα ηλεκτρόδια αυτά χρησιμοποιούνται συνήθως με ορθή πολικότητα δηλαδή το ηλεκτρόδιο συνδέεται στον αρνητικό πόλο της πηγής, και για τη σωστή λειτουργία τους, απαιτείται η χρήση συνεχούς ρεύματος. Υπάρχουν όμως και ηλεκτρόδια τέτοιου τύπου που μπορούν να λειτουργήσουν και με ανάστροφη πολικότητα (ηλεκτρόδιο θετικό) καθώς και με εναλλασσόμενο ρεύμα.

Τα ηλεκτρόδια με οργανική επικάλυψη, μπορούν και εξασφαλίζουν καλή προστασία της λίμνης της συγκόλλησης, καλές μηχανικές ιδιότητες στο μέταλλο συγκόλλησης, διατηρούν σταθερό ηλεκτρικό τόξο και εμφανίζουν βαθιά διείσδυση ανεξαρτήτως της θέσης συγκόλλησης. Παρόλα αυτά η υψηλή παρουσία υδρογόνου στη δημιουργούμενη ατμόσφαιρα αερίων μπορεί να οδηγήσει σε φαινόμενα ψυχρής ρωγμάτωσης στην περιοχή της θερμικά επηρεασμένης ζώνης.

ii. Ηλεκτρόδια με βασική επικάλυψη

Τα συστατικά της επικάλυψης αυτών των ηλεκτροδίων είναι κυρίως ανθρακικό ασβέστιο (CaCO_3) και φθοριούχο ασβέστιο (CaF_2) τα οποία όταν διασπώνται λόγω της υψηλής θερμοκρασίας που αναπτύσσεται από το τόξο δημιουργούν σκουριά οξειδίου του ασβεστίου (CaO). Τα ηλεκτρόδια αυτά λόγω των χαμηλών ποσοτήτων υδρογόνου που παράγονται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης ονομάζονται ηλεκτρόδια «Χαμηλού Υδρογόνου» και η έλλειψή του τα καθιστά ιδανικά για τη συγκόλληση χαλύβων υψηλής αντοχής που είναι ιδιαίτερα ευπαθείς σε προσβολή από υδρογόνο. Επίσης αυτού του τύπου η επικάλυψη προτιμάται για συγκολλήσεις ανοξείδωτων χαλύβων, κραμάτων χαλκού και νικελίου, αλλά και χυτοσιδήρων.

iii. Ηλεκτρόδια με όξινη επικάλυψη

Η χρήση των συγκεκριμένων ηλεκτροδίων ενδείκνυται για μαλακούς χάλυβες, για τη συγκόλληση των οποίων χρησιμοποιούνται εδώ και δεκαετίες. Το κυρίαρχο συστατικό που απαντάται στην επικάλυψη αυτών των ηλεκτροδίων είναι το οξείδιο του πυριτίου και

περιέχονται επίσης μικρά ποσοστά μαγγανίου και πυριτίου. Η χρήση αυτών των ηλεκτροδίων περιορίζει σημαντικά την ταχύτητα της συγκόλλησης αλλά έχουν μεγαλύτερη ταχύτητα έναυσης του τόξου. Οι μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων που προκύπτουν από τη χρήση αυτών των ηλεκτροδίων είναι σχετικά χαμηλές, κυρίως όσον αφορά στο όριο διαρροής και στην αντοχή σε εφελκυσμό, αλλά παρουσιάζουν μεγαλύτερη δυσθραυστότητα από τα αποτελέσματα των ηλεκτροδίων ρουτιλίου που θα αναφερθούν παρακάτω. Τα τελευταία χρόνια έχουν παραχθεί όξινα ηλεκτρόδια υψηλής αποδοτικότητας που αποδίδουν σωστές ραφές ακόμα και σε υψηλές ταχύτητες συγκόλλησης και έχουν ευρεία εφαρμογή σε επίπεδες αυχενικές και κατά συμβολή συγκολλήσεις.

iv. Ηλεκτρόδια με επικάλυψη ρουτιλίου

Το βασικό συστατικό (σε ποσοστό άνω του 50%) της επικάλυψης των παραπάνω ηλεκτροδίων είναι το οξείδιο του τιτανίου (TiO_2), ενώ έχει περιεκτικότητα 15% σε πυριτικό νάτριο και περιλαμβάνει διάφορα σιδηρούχα-μαγγανιούχα κράματα και πυριτικά άλατα. Η χρήση του είναι κατάλληλη για συγκολλήσεις μαλακών χαλύβων και χαλύβων με χαμηλή περιεκτικότητα σε άνθρακα, ενώ πολλές φορές αναφέρονται ως ηλεκτρόδια γενικού σκοπού (GP electrodes). Τα ηλεκτρόδια αυτά μπορούν να χρησιμοποιηθούν τόσο με συνεχές ρεύμα όσο και με εναλλασσόμενο. Δημιουργούν ένα πυκνό στρώμα σκουριάς που αφαιρείται εύκολα και προστατεύει τη λίμνη της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα, ενώ παράλληλα δημιουργούν συνθήκες σταθερού τόξου με αποτέλεσμα τη δραστική μείωση των εκτοξεύσεων. Τα μεγάλα ποσοστά υδρογόνου που παράγονται λόγω της εξάτμισης της υγρασίας που είναι απαραίτητη για τη σωστή διατήρηση και χρήση των συγκεκριμένων ηλεκτροδίων, καθιστά τις παραγόμενες συγκολλήσεις ευπαθείς σε ρωγματώσεις.

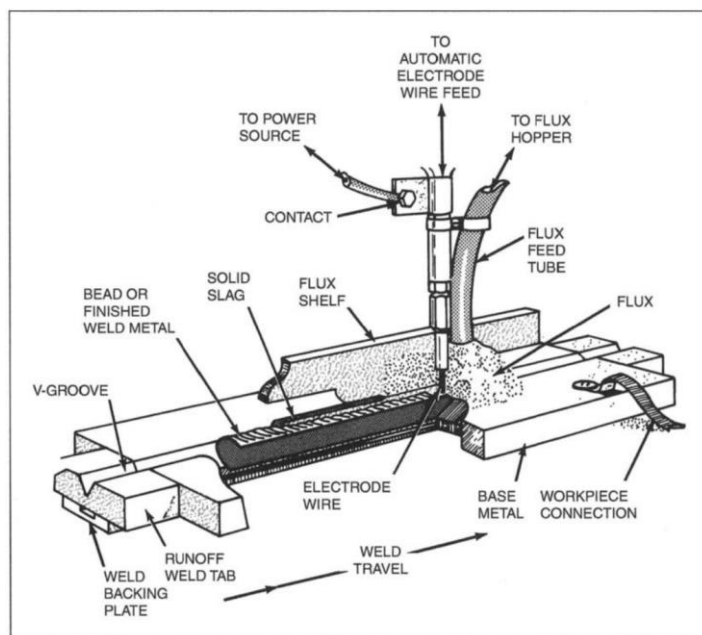
Τα τελευταία χρόνια, προς αντικατάσταση των απλών ηλεκτροδίων ρουτιλίου, χρησιμοποιούνται ηλεκτρόδια με επικάλυψη όξινη – ρουτιλίου (acid – rutile). Τα ηλεκτρόδια αυτά προσφέρουν ευκολότερη έναυση τόξου, χαμηλά επίπεδα εκτοξεύσεων και εύκολη αφαίρεση σκουριάς, παρόλα αυτά ο κίνδυνος αυξημένου πορώδους είναι σχετικά μεγάλος.

v. Ηλεκτρόδια με επικάλυψη μεταλλικής σκόνης

Η επικάλυψη αυτών των ηλεκτροδίων αποτελείται σε πολύ μεγάλο ποσοστό από σκόνη σιδήρου, η οποία δρα ενισχυτικά στο μέταλλο προσθήκης. Με τον τρόπο αυτό αυξάνεται πολύ η αποδοτικότητα του ηλεκτροδίου (η σκόνη επικάλυψης αυξάνει το μέταλλο προσθήκης κατά 75% σε σχέση με άλλου είδους ηλεκτρόδια) αλλά περιορίζεται η χρήση του σε επίπεδες, οριζόντιες ή κάθετες συγκολλήσεις.

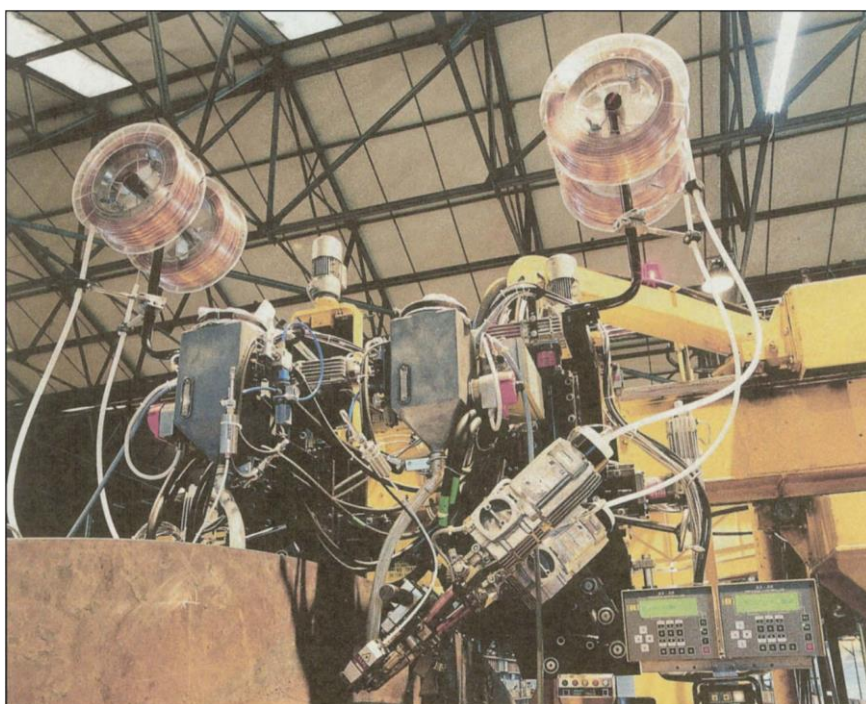
1.1.2 Συγκόλληση Βυθισμένου Τόξου (Submerged Arc Welding, SAW) [3], [5]

Η μέθοδος βυθισμένου τόξου αξιοποιεί τη θερμότητα ενός ηλεκτρικού τόξου που αναπτύσσεται μεταξύ ενός συνεχώς τροφοδοτούμενου καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου, υπό την προστασία κοκκώδους εύτηκτου υλικού (συλλιπάσματος). Το τόξο είναι πλήρως βυθισμένο κάτω από την τηγμένη επιφάνεια του συλλιπάσματος και έτσι παρέχεται πλήρης προστασία στη λίμνη της συγκόλλησης από την ατμόσφαιρα και εξαλείφονται πλήρως οι εκτοξεύσεις, ενώ η εκπομπή καυσαερίων είναι μηδαμινή κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης. Η εικόνα που ακολουθεί παρουσιάζει τη μέθοδο SAW καθώς και κάποια βασικά εξαρτήματα της διάταξής της.



Εικόνα 1.3 Σχηματική αναπαράσταση της συγκόλλησης SAW

Το συνεχώς τροφοδοτούμενο ηλεκτρόδιο μπορεί να είναι είτε συμπαγές είτε σωληνοειδές. Τα συμπαγή ηλεκτρόδια συνήθως έχουν επικάλυψη χαλκού για προστασία από τη διάβρωση. Αντίστοιχα, τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια μπορεί να περιέχουν μεταλλική σκόνη ή μίγμα σκόνης μετάλλου και συλλιπάσματος. Το υλικό του πυρήνα αυτών των ηλεκτροδίων επηρεάζει τα χαρακτηριστικά συγκόλλησης και τη μεταλλουργική ποιότητα του μετάλλου προσθήκης.



Εικόνα 1.4 Χρήση της μεθόδου SAW για τη συγκόλληση ανθεκτικού σκάφους υποβρυχίου

Η σκόνη συλλιπάσματος που εναποτίθεται καθ' όλη τη διάρκεια της συγκόλλησης, μπορεί να είναι όξινη, βασικού ή ουδέτερου pH. Η όξινη σκόνη εξασφαλίζει ομαλές συνθήκες συγκόλλησης αλλά αποδίδει συγκολλήσεις με χαμηλού επιπέδου μηχανικές ιδιότητες. Από την άλλη, η βασική σκόνη, προσδίδει καλές μηχανικές ιδιότητες αλλά έχει κατώτερα

χαρακτηριστικά συγκόλλησης. Η σκόνη ουδέτερου pH δύναται να ισορροπήσει τα χαρακτηριστικά των παραπάνω δύο ειδών σκόνης. Η επιλογή του είδους της σκόνης έχει να κάνει σε μεγάλο βαθμό με τις συνθήκες που θα διεξαχθεί η συγκόλληση καθώς και με τα απαιτούμενα μεταλλουργικά χαρακτηριστικά που είναι απαραίτητο να επιτευχθούν. Η μέθοδος SAW μπορεί να λειτουργήσει τόσο με συνεχές ρεύμα όσο και με εναλλασσόμενο. Παρόλα αυτά οι ιδανικές συνθήκες ρεύματος και τάσης συγκόλλησης είναι πιο εύκολα επιτεύξιμες με συνεχές ρεύμα ηλεκτρόδιο θετικό (direct current – electrode positive, DCEP). Η χρήση συνεχούς ρεύματος με ηλεκτρόδιο αρνητικό δίνει μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης μετάλλου προσθήκης αλλά δεν εγγυάται σωστή τήξη των μετάλλων βάσης και προσθήκης, με αποτέλεσμα να χρησιμοποιείται πιο συχνά σε περιπτώσεις επιφανειακής επίστρωσης μετάλλου. Η χρήση του εναλλασσόμενου ρεύματος είναι μεν δυνατή αλλά δεν εξασφαλίζει σωστό έλεγχο του ηλεκτρικού τόξου όπως η κατάσταση χρήσης DCEP.

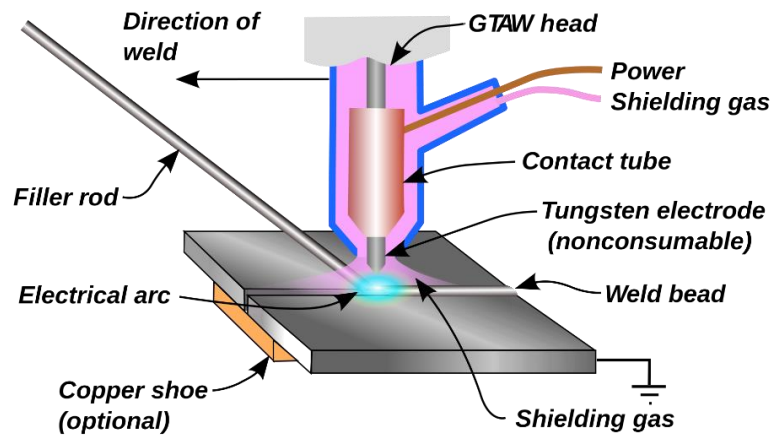
Η μέθοδος του βυθισμένου τόξου μπορεί να λειτουργήσει σε μεγάλες εντάσεις ηλεκτρικού ρεύματος, το οποίο είναι η παράμετρος εκείνη που καθορίζει το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης και το βάθος της διείσδυσης, δηλαδή το ποσοστό του μετάλλου βάσης που θα συμπεριλαμβάνεται στο μέταλλο συγκόλλησης. Η τάση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι η παράμετρος που καθορίζει το πλάτος της ραφής και την όψη του κορδονιού. Η αύξηση της τάσης συγκόλλησης αυξάνει το μήκος του ηλεκτρικού τόξου με αποτέλεσμα να αυξάνεται και το πλάτος της ραφής. Η ταχύτητα της συγκόλλησης υπό σταθερές συνθήκες έντασης και τάσης ρεύματος επηρεάζει την προσδιδόμενη ενέργεια με αποτέλεσμα τελικά να επιδρά στο ποσό του προσδιδόμενου μετάλλου ανά μονάδα μήκους της συγκόλλησης. Επίσης, οι χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης δίνουν τον απαραίτητο χρόνο διαφυγής στα παραγόμενα καυσαέρια με αποτέλεσμα αυτά να μην παγιδεύονται στη λίμνη συγκόλλησης και να εξασφαλίζεται πολύ χαμηλό πορώδες. Η έκταση του ηλεκτροδίου, δηλαδή η απόσταση του ακροφυσίου του πυρσού συγκόλλησης από την άκρη του προεξέχοντος ηλεκτροδίου, επηρεάζει δραστικά το βάθος της διείσδυσης και το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης. Η αύξηση της έκτασης του ηλεκτροδίου αυξάνει το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου συγκόλλησης και μειώνει τη διείσδυση της συγκόλλησης. Έτσι για τον πλήρη έλεγχο της διαδικασίας, στην περίπτωση της μεθόδου βυθισμένου τόξου, η έκταση του ηλεκτροδίου διατηρείται μεταξύ 25 και 35 mm. Οι παραπάνω παράμετροι επηρεάζουν συνολικά τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων τόξου, αλλά την κάθε μία από αυτές με διαφορετικό τρόπο και της προσδίδουν ιδιαίτερα χαρακτηριστικά.

Η μέθοδος βυθισμένου τόξου χρησιμοποιείται ευρέως για τη συγκόλληση παχέων ελασμάτων ανθρακούχων, κραματωμένων και ανοξείδωτων χαλύβων. Η δυνατότητα που παρέχει αυτή η μέθοδος παραγωγής συγκολλήσεων υψηλής ποιότητας, χωρίς σφάλματα, με πολύ μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης μετάλλου προσθήκης και βάθος διείσδυσης, την καθιστά μια μέθοδο ιδανική για όλες της ημιαυτοματοποιημένες και αυτοματοποιημένες εφαρμογές που απαιτούν συγκολλήσεις. Στη ναυπηγική ιδιαίτερα χρησιμοποιείται σε μετωπικές συγκολλήσεις με δύο πάσα ένα σε κάθε πλευρά των ελασμάτων. Τα ενισχυτικά των νομέων συγκολλώνται με τη χρήση της μεθόδου ενός ή δύο πάσων.

1.1.3 Συγκόλληση με Ηλεκτρόδιο Βολφραμίου και Προστασία Αερίου (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW) [3], [6], [7]

Η μέθοδος GTAW, γνωστή και ως TIG (tungsten inert gas), είναι μια μέθοδος συγκόλλησης που παράγει ένα ηλεκτρικό τόξο μεταξύ ενός μη καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου βολφραμίου και του προς συγκόλληση τεμαχίου. Όλη η περιοχή της συγκόλλησης προστατεύεται από τον

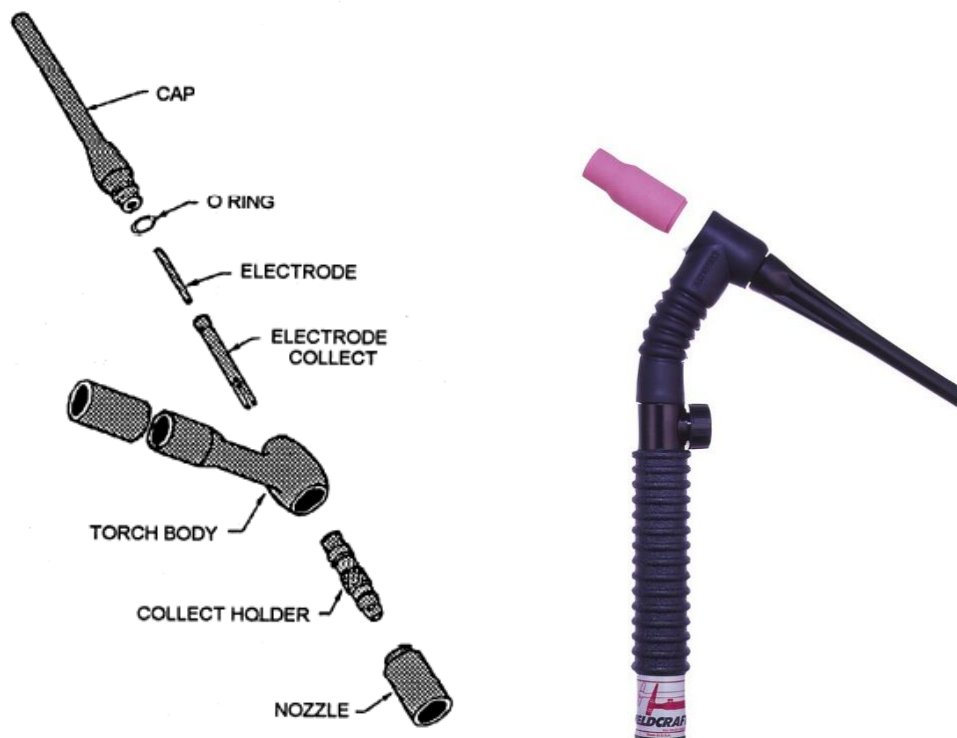
ατμοσφαιρικό αέρα με αέριο προστασίας το οποίο παρέχεται από την άκρη του πυρσού της συγκόλλησης. Η μέθοδος αυτή μπορεί να χρησιμοποιηθεί με ή χωρίς μέταλλο προσθήκης.



Εικόνα 1.5 Σχηματική αναπαράσταση διάταξης GTAW

Το ηλεκτρόδιο βολφραμίου μπορεί προσδώσει ενέργεια στα προς συγκόλληση τεμάχια αυξάνοντας τη θερμοκρασία μέχρι και στους 19426°C , έτσι τα τεμάχια όταν πρόκειται για λεπτά ελάσματα λιώνουν στο σημείο συμβολής τους και επιτυγχάνεται η συγκόλληση. Στην περίπτωση παχέων ελασμάτων μπορεί να υπάρξει προσθήκη μετάλλου χειροκίνητα με τη μορφή ράβδου στην περιοχή της συγκόλλησης (όπως γίνεται στην περίπτωση συγκόλλησης με οξυγόνο-ασετυλίνη) ή με τη μορφή συνεχώς τροφοδοτούμενου σύρματος.

Η μέθοδος GTAW, χρησιμοποιείται ευρέως για τη συγκόλληση απλού ή ανοξείδωτου χάλυβα, νικελιούχων κραμάτων, τιτανίου, αλουμινίου, μαγνησίου, χαλκού, μπρούτζου, ορείχαλκου ακόμα και χρυσού.



Εικόνα 1.6 Φυσική απεικόνιση και σχηματική αναπαράσταση του πυρσού συγκόλλησης της μεθόδου GTAW

Πλεονεκτήματα της μεθόδου:

- Η εστίαση του τόξου μπορεί να έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία θερμικά επηρεασμένης ζώνης μικρής έκτασης.
- Η απουσία σκουριάς καθιστά μη απαραίτητη την ύπαρξη σκόνης συλλιπάσματος και έτσι ο συγκολλητής έχει οπτική επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης.
- Η χρήση ηλεκτροδίου βολφραμίου έχει σαν αποτέλεσμα την απουσία μεταφοράς τηγμένου μετάλλου προσθήκης κατά μήκος του ηλεκτρικού τόξου και έτσι υπάρχει πλήρης απουσία εκτοξεύσεων.
- Παράγονται χαμηλά επίπεδα καυσαερίων εκτός και αν το μέταλλο βάσης έχει επιστρώσεις ή κραματικά στοιχεία που με την αύξηση της θερμοκρασίας εκπέμπουν καυσαέρια λόγω καύσης ή τήξης τους.
- Η μέθοδος αυτή μπορεί να προσαρμοστεί και να συγκολλήσει τη μεγαλύτερη γκάμα μετάλλων και κραμάτων από όποια άλλη μέθοδο τόξου.
- Είναι μια μέθοδος που είναι κατάλληλη για τη συγκόλληση πολύ λεπτών υλικών όπως έχει ήδη αναφερθεί.
- Μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε ανομοιογενείς συγκολλήσεις.

Μειονεκτήματα της μεθόδου

- Χαμηλές ταχύτητες συγκόλλησης σε σχέση με άλλες μεθόδους τόξου
- Χαμηλοί ρυθμοί εναπόθεσης μετάλλου προσθήκης
- Είναι μια μέθοδος που απαιτεί μεγάλη εμπειρία και εξοικείωση του χειριστή
- Παράγει πολύ υψηλά επίπεδα υπερϊώδους ακτινοβολίας και απαιτεί ειδικά μέτρα προστασίας
- Έχει υψηλό κόστος εξοπλισμού
- Οι υψηλές συγκεντρώσεις αερίου προστασίας μπορούν εύκολα να μειώσουν τα ποσοστά οξυγόνου όταν η μέθοδος χρησιμοποιείται σε κλειστό χώρο.

Τα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται στη μέθοδο GTAW είναι το Αργό, το Ήλιο και μίγματα αυτών. Τα χαρακτηριστικά που προσδίδουν τα αέρια αυτά στις παραμέτρους της συγκόλλησης και στο τελικό αποτέλεσμα αυτής φαίνονται στον παρακάτω πίνακα.

Πίνακας 1.1 Χαρακτηριστικά που προσδίδουν τα αέρια προστασίας στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο GTAW

CHARACTERISTICS	ARGON	ARGON/HELIUM MIXES	HELIUM
Travel Speed	Reduced travel speeds	Improved travel speeds over 100% Argon	Faster travel speeds
Penetration	Reduced penetration	Improved penetration over 100% Argon	Increased penetration
Cleaning	Good cleaning action	Cleaning properties closer to Argon	Less cleaning action
Arc Starting	Easier arc starting	Improved arc starting over 100% Helium	Difficult arc starting
Arc Stability	Good arc stability	Improved arc stability over 100% Helium	Less low amperage stability
Arc Cone	Focused arc cone	Arc cone shape more focused than w/Helium	Flared arc cone
Arc Voltage	Lower arc voltages	Arc voltages between 100% Argon and Helium	Higher arc voltages
Flow Rate	Lower flow rates 10-30 CFH	Higher flow rates than Argon	Higher flow rates (2 times)
Cost	Lower cost and greater availability	Costs higher than Argon	Higher cost than Argon

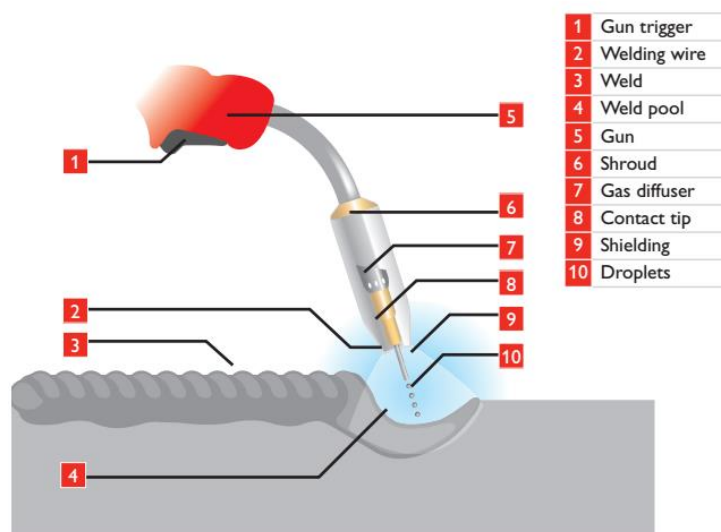
1.2 Συγκόλληση με Τηκόμενο Ηλεκτρόδιο και Προστασία Αερίου (Gas Metal Arc Welding – GMAW)

1.2.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου GMAW [3], [6], [8], [9]

Η μέθοδος GMAW γνωστή και ως MIG, είναι μία μέθοδος συγκόλλησης που αξιοποιεί την θερμότητα που εκλύεται από ένα ηλεκτρικό τόξο προκειμένου να τήξει το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο και το μέταλλο βάσης και να επιτευχθεί μόνιμη συγκόλληση των τεμαχίων. Η τήξη πραγματοποιείται υπό την παρουσία αερίου προστασίας όπως Αργό (Ar) ή Ήλιο (He) ή μιγμάτων αυτών με φθηνότερα αέρια όπως Οξυγόνο ή Διοξείδιο του Άνθρακα, προκειμένου να αποφευχθεί η επαφή του τηγμένου μετάλλου με την ατμόσφαιρα. Εφαρμόζοντας υψηλή ένταση ρεύματος, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται και το τηγμένο μέταλλο (μέταλλο προσθήκης) μεταφέρεται στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Η παροχή του ηλεκτροδίου γίνεται αυτόματα προς τη λίμνη συγκόλλησης. Για να γίνει αυτό απαιτείται η χρήση καρουλιού που ξετυλίγεται μέσω μιας μηχανής τροφοδοσίας με σταθερή ταχύτητα. Ο ρυθμός παροχής του ηλεκτροδίου είναι μια πολύ σημαντική παράμετρος που καθορίζει το αποτέλεσμα αυτής της μεθόδου.

Η μέθοδος αυτή αρχικά χρησιμοποιείτο για τη συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου αλλά μεταγενέστερες εξελίξεις κατάφεραν τη λειτουργία της μεθόδου με χαμηλή πυκνότητα ρεύματος και παλλόμενο ρεύμα πράγμα που την κατέστησε κατάλληλη και για συγκόλληση άλλων υλικών με τη χρήση ενεργών αερίων (κυρίως διοξείδιο του άνθρακα, CO₂) και μιγμάτων αερίων. Η μέθοδος GMAW χρησιμοποιείται σε πολλούς τομείς βιομηχανικής κατασκευής, όπως σε βιομηχανικά εργοστάσια, στη ναυπηγική και την εξορυκτική βιομηχανία, για συγκόλληση σωληνώσεων, δοχείων πίεσης, χαλύβδινων δομικών στοιχείων και πληθώρα άλλων προϊόντων.

Η μέθοδος GMAW μπορεί να εφαρμοστεί σε ημιαυτόματες ή πλήρως αυτοματοποιημένες διαδικασίες συγκόλλησης. Όλα τα εμπορικά σημαντικά μέταλλα, μπορούν να συγκολληθούν με τη μέθοδο GMAW (απλοί ανθρακούχοι χάλυβες, χάλυβες HSLA, αλουμίνιο, τιτάνιο, κράματα νικελίου), επιλέγοντας το κατάλληλο αέριο προστασίας, ηλεκτρόδιο, και τις παραμέτρους της συγκόλλησης. Με την επιλογή των παραπάνω παραμέτρων γίνεται δυνατή η συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης. Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται ο πυρσός της συγκόλλησης GMAW.



Εικόνα 1.7 Αναπαράσταση της διαδικασίας συγκόλλησης με τη μέθοδο GMAW

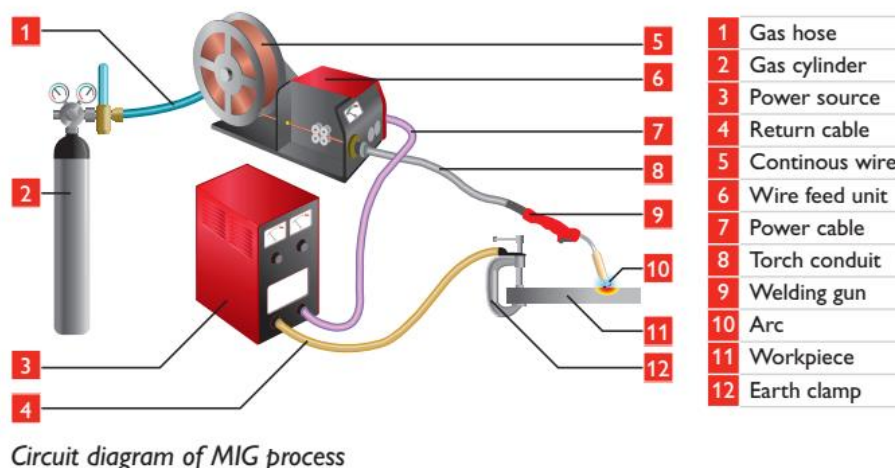
Η μέθοδος αυτή βασίζεται στην αυτόματη, συνεχή, τροφοδοσία του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου, το οποίο περικλείεται από το αέριο προστασίας. Αφού ο χρήστης έχει καθορίσει τις αρχικές συνθήκες της συγκόλλησης, η κατάλληλη παραμετροποίηση της διάταξης, διατηρεί σταθερές τις ιδιότητες του ηλεκτρικού τόξου. Στη χειροκίνητη συγκόλληση με τη μέθοδο GMAW, ο χειριστής (συγκολλητής) περιορίζεται στο να διατηρεί σταθερή την ταχύτητα συγκόλλησης, τη διεύθυνσή της και τη θέση του πιστολιού συγκόλλησης. Παρέχοντας τις κατάλληλες παραμέτρους και εξοπλισμό συγκόλλησης, η τροφοδοσία του ηλεκτροδίου και η διατήρηση του ηλεκτρικού τόξου γίνονται αυτόματα.

Στη μέθοδο GMAW, συνηθίζεται η χρήση πηγής σταθερής τάσης, σε συνδυασμό με μηχανή σταθερής παροχής του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου. Με αυτόν το συνδυασμό, οι αλλαγές που μπορεί να συμβούν στην αλλαγή της θέσης του πιστολιού συγκόλλησης, έχουν αντίκτυπο στην αυξομείωση του ρεύματος της συγκόλλησης λόγω της αλλαγής της έκτασης του ηλεκτροδίου. Παραδείγματος χάριν, όταν αυξάνεται απότομα η απόσταση πιστολιού – τεμαχίου, το μήκος του ηλεκτρικού τόξου γίνεται στιγμιαία μεγαλύτερο. Το μεγάλο μήκος του ηλεκτρικού τόξου, προκαλεί μείωση της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος μειώνοντας τελικά το ρυθμό τήξης του ηλεκτροδίου. Από τη στιγμή που ο ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου παραμένει σταθερός, αποκαθίσταται η απόσταση μεταξύ ηλεκτροδίου και τεμαχίου, υπάρχει μείωση του μήκους του ηλεκτρικού τόξου, εμφανίζεται αύξηση του ηλεκτρικού ρεύματος και τελικά έχουμε εξίσωση του ρυθμού τήξης του ηλεκτροδίου με το ρυθμό παροχής του. Η τελική ένταση ρεύματος που αποκαθίσταται σε μεγάλη έκταση ηλεκτροδίου (μικρό μήκος ηλεκτρικού τόξου) είναι μικρότερη από αυτή που προκύπτει όταν υπάρχει μικρή έκταση ηλεκτροδίου. Σαν συνέπεια αυτού, η θέρμανση του τεμαχίου καθώς και η διείσδυση της συγκόλλησης μειώνονται.

1.2.2 Εξοπλισμός – Διάταξη Συγκόλλησης [3], [6], [10], [11], [12]

Η τυπική διάταξη που χρησιμοποιείται στη μέθοδο GMAW αποτελείται από διάφορα επιμέρους εξαρτήματα. Τα πιο βασικά από αυτά είναι:

- Η μηχανή της συγκόλλησης
- Το χειριστήριο
- Η τροφοδοσία του ηλεκτροδίου
- Το πιστόλι συγκόλλησης (ή πυρσός συγκόλλησης)
- Η παροχή του αερίου προστασίας
- Το ηλεκτρόδιο
- Το σύστημα ψύξης του πυρσού της συγκόλλησης



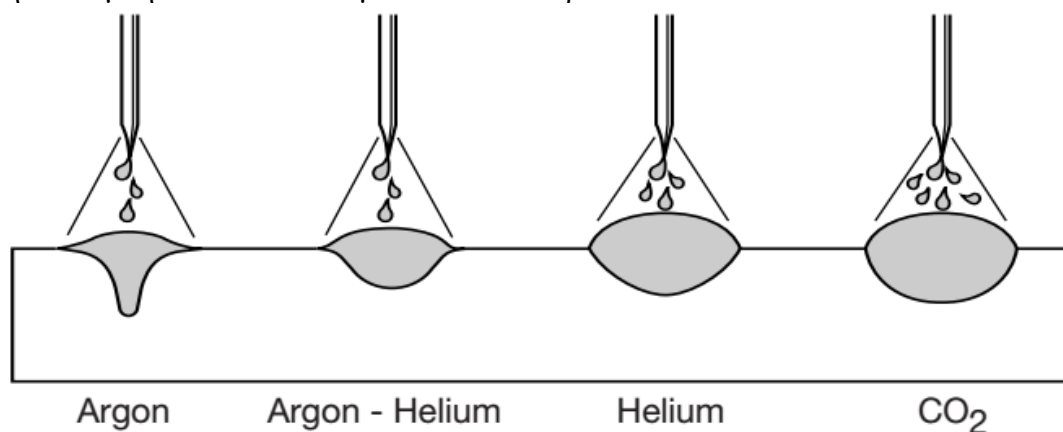
Εικόνα 1.8 Διάταξη συγκόλλησης MIG.

1.2.3 Αέρια προστασίας [6], [9], [10], [11], [13], [14]

Η κύρια λειτουργία των αερίων προστασίας είναι η προστασία της λίκνης της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Αυτό κρίνεται απαραίτητο διότι τα περισσότερα μέταλλα όταν θερμαίνονται κοντά στο σημείο τήξης τους παρουσιάζουν την τάση να αντιδρούν με το οξυγόνο της ατμόσφαιρας και να δημιουργούν οξειδία, ή, σε λιγότερες περιπτώσεις, αντιδρούν με το άζωτο και σχηματίζουν νιτρίδια. Επίσης το οξυγόνο που περιέχεται στον ατμοσφαιρικό αέρα, αντιδρά με τον άνθρακα που περιέχεται στον τηγμένο χάλυβα και δημιουργείται μονοξείδιο του άνθρακα (CO) και διοξείδιο του άνθρακα (CO₂), ενώσεις των οποίων η παρουσία μπορεί να οδηγήσει σε ασυνέχειες της συγκόλλησης, όπως είναι εγκλείσματα οξειδίων, πόροι και αυξημένη ψαθυρότητα του μετάλλου συγκόλλησης. Τέτοιες ενώσεις μπορούν να δημιουργηθούν εύκολα στην περιοχή της συγκόλλησης εκτός και αν αποφευχθεί η παρουσία οξυγόνου και αζώτου.

Εκτός από την προστασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα, τα αέρια προστασίας μπορούν να επηρεάσουν τις ακόλουθες παραμέτρους της συγκόλλησης:

1. Τα χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού τόξου.
2. Τον τρόπο μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης.
3. Το βάθος της διείσδυσης και τη μορφή του εναποτιθέμενου μετάλλου.
4. Την ταχύτητα που διεξάγεται η συγκόλληση.
5. Τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου της συγκόλλησης.
6. Τον περιορισμό των εκτοξεύσεων.
7. Την αραίωση του μετάλλου βάσης στο μέταλλο της συγκόλλησης.
8. Την εκπομπή επικίνδυνων ατμών και καυσαερίων.



Εικόνα 1.9 Επίδραση του αερίου προστασίας στην εμφάνιση της ραφής και στο βάθος διείσδυσης

Ο ρυθμός που παρέχεται το αέριο προστασίας στην περιοχή της συγκόλλησης έχει μεγάλη σημασία για την ποιότητα του μετάλλου συγκόλλησης και για την επιφάνεια της συγκόλλησης. Η χαμηλή παροχή αερίου οδηγεί σε ατελείς συγκολλήσεις αφού ο ατμοσφαιρικός αέρας «μολύνει» τη λίκνη της συγκόλλησης, ενώ η πολύ μεγάλη παροχή οδηγεί σε αναταράξεις του νέφους του αερίου προστασίας όπως αυτό βγαίνει από το ακροφύσιο με αποτέλεσμα να έχουμε πάλι την εισαγωγή οξυγόνου και αζώτου στη λίκνη της συγκόλλησης και τη δημιουργία ανεπιθύμητων οξειδίων και νιτρίδιων και πορώδους, όπως έχει αναφερθεί. Παράγοντες που επηρεάζουν την επιλογή του κατάλληλου ρυθμού παροχής αερίου προστασίας είναι:

- Η πυκνότητα του χρησιμοποιούμενου αερίου.
- Το μέγεθος του ακροφυσίου.
- Η απόσταση του ακροφυσίου από το προς συγκόλληση τεμάχιο.
- Το είδος του προς συγκόλληση μετάλλου.

- Το είδος της συμβολής των ελασμάτων και η θέση της συγκόλλησης
- Η εκτιμώμενη ποσότητα εξατμίσεων και καυσαερίων
- Οι συνθήκες της συγκόλλησης πχ μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων, μεταφορά με βραχυκύκλωση κλπ.
- Η ύπαρξη ρευμάτων αέρα, η ταχύτητά τους κλπ.

Μια ενδεικτική παροχή αερίου προστασίας για την επίτευξη μεταφοράς με τη μορφή σταγονιδίων για την περίπτωση που χρησιμοποιείται 100% αργό (Ar) σαν αέριο προστασίας, είναι 15-25 lt/min. Προφανώς όσο αυξάνεται η διάμετρος του ακροφυσίου, θα πρέπει να αυξάνεται η παροχή του αερίου προστασίας.

Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τα ενδεικνύμενα αέρια προστασίας για την επίτευξη μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης με τη μορφή σταγονιδίων, για συγκολλήσεις διαφόρων μετάλλων.

Πίνακας 1.2 Αέρια προστασίας για την επίτευξη μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης με τη μορφή σταγονιδίων.

GMAW Shielding Gases for Spray Transfer		
Metal	Shielding Gas	Characteristics
Aluminum	100% argon	Best metal transfer and arc stability; least spatter; good cleaning action.
	35% argon–65% helium	Higher heat input than 100% argon; improved fusion characteristics on thicker material; minimizes porosity.
	25% argon–75% helium	Highest heat input; minimizes porosity; least cleaning action.
Magnesium	100% argon	Excellent cleaning action; stable arc.
	Argon +20%–70% helium	Improved wetting; less chance of porosity.
Carbon steel	1%–5% oxygen, balance argon	Improves arc stability; produces a more fluid and controllable weld pool; good fusion and bead contour; minimizes undercutting; permits higher speeds than pure argon.
	5%–15% carbon dioxide, balance argon	High-speed mechanized welding; low-cost manual welding.
Low-alloy steel	98% argon–2% oxygen	Minimizes undercutting; provides good toughness.
Stainless steel	99% argon–1% oxygen	Improves arc stability; produces a more fluid and controllable weld pool, good fusion and bead contour; minimizes undercutting on heavier stainless steels.
	98% argon–2% oxygen	Provides better arc stability, coalescence, and welding speed than 1% oxygen mixture for thinner stainless steel materials.
Nickel, copper, and their alloys	100% argon	Provides good wetting; decreases fluidity of weld metal.
	Argon-helium	Higher heat inputs of 50% and 75% helium mixtures offset high heat dissipation of heavier gauges.
Titanium	100% argon	Good arc stability; minimum weld contamination; inert gas backing is required to prevent air contamination on back of weld area.

Εκτός από την υπεριώδη ακτινοβολία (UV radiation), που εκπέμπεται κατά τη διάρκεια μιας συγκόλλησης GMAW, η εκπομπή επιβλαβών αερίων εντάσσεται στους πρωταρχικούς κινδύνους που συνδέονται με τη μέθοδο αυτή. Σαν πρώτη προσέγγιση, η αύξηση της εκπομπής αερίων συνδέεται άμεσα με την οξειδωτική ικανότητα του προστατευτικού αερίου, όμως φαίνεται πως η αυξημένη εκπομπή καυσαερίων συνδέεται και με τις συνθήκες του ρεύματος οι οποίες έχουν επιλεγεί για τη συγκόλληση.

Αδρανή Αέρια

Το Αργό (Ar) είναι το πιο συχνά χρησιμοποιούμενο αδρανές αέριο προστασίας στη μέθοδο GMAW και η χρήση του λειτουργεί προωθητικά στο να υπάρχει μεταφορά τηγμένου μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (spray transfer). Το Αργό έχει χαμηλές ενεργειακές απαιτήσεις προκειμένου να ιονιστεί και έτσι η χρήση του συμβάλει στη γρήγορη εκκίνηση του ηλεκτρικού τόξου καθώς και στη σταθερή διατήρησή του.

Το Ήλιο (He) προστίθεται συχνά σε μίγμα αερίου προστασίας όταν πρόκειται να εφαρμοστεί η μέθοδος της GMAW για συγκόλληση ανοξείδωτων χαλύβων ή αλουμινίου. Η προσθήκη Ηλίου έχει σαν αποτέλεσμα την αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας του αερίου μίγματος που οδηγεί σε φαρδιά ραφή συγκόλλησης αλλά σε μικρότερη διείσδυση. Επίσης η προσθήκη Ηλίου συμβάλλει δραστικά στη μείωση της διάλυσης οξειδίων στο μέταλλο συγκόλλησης. Αέρια μίγματα Αργού/Ηλίου χρησιμοποιούνται συνήθως για τη συγκόλληση ελασμάτων αλουμινίου μεγάλου πάχους (μεγαλύτερο από 25mm).

Ενεργά Αέρια

Το Οξυγόνο, το Υδρογόνο, το Άζωτο και το Διοξείδιο του Άνθρακα είναι ενεργά αέρια τα οποία αντιδρούν με το τηγμένο μέταλλο της λίμνης συγκόλλησης για την επίτευξη ενός επιθυμητού αποτελέσματος

Το Διοξείδιο του Άνθρακα (CO_2) είναι αδρανές σε θερμοκρασία δωματίου, αλλά με την υψηλή θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω του ηλεκτρικού τόξου γίνεται ενεργό. Τα προϊόντα της διάσπασης του διοξειδίου του άνθρακα αντιδρούν με τη λίμνη της συγκόλλησης και δημιουργούν οξείδια που είτε δημιουργούν νησίδες στην επιφάνεια της λίμνης συγκόλλησης ή συγκεντρώνονται στη ρίζα της. Η προσθήκη κατάλληλης ποσότητας Διοξειδίου του Άνθρακα σε διμερή ή τριμερή μίγματα αερίων προστασίας, μπορεί να συμβάλει στην αύξηση της αντοχής σε εφελκυσμό και του ορίου διαρροής της συγκόλλησης.

Το Οξυγόνο (O) αντιδρά με συστατικά της λίμνης της συγκόλλησης και δημιουργούνται οξείδια. Μικρά ποσοστά οξυγόνου (1-5%) σε αργό συμβάλουν στη σταθερότητα του ηλεκτρικού τόξου και στην καλή εμφάνιση της ραφής της συγκόλλησης.

Το Υδρογόνο (H) σε μικρές ποσότητες προσθήκης σε αργό, λόγω της υψηλής θερμικής του αγωγιμότητας επιτρέπει τη γρήγορη τήξη των μετάλλων βάσης και προσθήκης με αποτέλεσμα να είναι δυνατή η εφαρμογή υψηλότερων ταχυτήτων συγκόλλησης.

Διμερή Μίγματα Αερίου Προστασίας

Αργό + Ήλιο: χρήσιμο μίγμα για τη συγκόλληση νικελιούχων χαλύβων και κραμάτων αλουμινίου. Ο τρόπος μεταφοράς τηγμένου μετάλλου που επιτυγχάνεται με αυτό το μίγμα είναι η μεταφορά με σταγονίδια ή η παλμική μεταφορά με σταγονίδια.

Συνήθη Μίγματα Αργού + Ηλίου:

- 75% Αργό + 25% Ήλιο – Μεγαλύτερη διείσδυση
- 75% Ήλιο + 25% Αργό – Αύξηση της θερμικής αγωγιμότητας, μεγάλη πλευρική διείσδυση

Αργό + CO_2 : μίγμα το οποίο μπορεί να οδηγήσει σε όλους τους τρόπους μεταφορά τηγμένου μετάλλου

Μίγματα μεταφοράς με βραχυκύκλωση:

- 75% Αργό + 25% CO_2 – Μείωση των εκτοξεύσεων, καλύτερη εμφάνιση συγκόλλησης
- 80% Αργό + 20% CO_2 – Περαιτέρω μείωση των εκτοξεύσεων, καλύτερη εμφάνιση συγκόλλησης ανθρακούχων χαλύβων.

Μίγματα μεταφοράς με σταγονίδια:

- 98% Αργό + 2% CO₂ – Επιτυχημένες συγκολλήσεις σε μεγάλες ταχύτητες συγκόλλησης
- 95% Αργό + 5% CO₂ – Μεγάλη ρευστότητα της λίμνης συγκόλλησης
- 90% Αργό + 10% CO₂ – Μεγάλο πλάτος συγκόλλησης
- 85% Αργό + 15% CO₂ – Καλό ποσοστό αραίωσης στην περίπτωση κοινών ανθρακούχων χαλύβων.
- 82% Αργό + 18% CO₂ – Μήκος τόξου ικανό να εξασφαλίζει μεγάλη διείδυση

Αργό + Οξυγόνο: το μίγμα αυτό μπορεί και εξασφαλίζει αξονική μεταφορά με σταγονίδια σε χαμηλότερες εντάσεις ρεύματος από το μίγμα Ar/CO₂. Η διάμετρος των σταγονιδίων είναι μικρότερη και έτσι εξασφαλίζεται μεγαλύτερη ρευστότητα στη λίμνη συγκόλλησης.

Συνήθη μίγματα Αργού + Οξυγόνου

- 99% Αργό + 1% Οξυγόνο – χρήση σε ανοξείδωτους χάλυβες. Η προσθήκη του οξυγόνου σταθεροποιεί το τόξο και προωθεί τη βελτιστοποίηση των σταγονιδίων που προσδίδουν αρκετά ρευστή λίμνη συγκόλλησης.
- 98% Αργό + 2% Οξυγόνο – χρήση τόσο σε κοινούς ανθρακούχους χάλυβες, όσο και σε ανοξείδωτους. Συνήθως χρησιμοποιείται σε περιπτώσεις που απαιτείται μεγάλη ταχύτητα συγκόλλησης και η παρουσία του συμβάλει στη μεταφορά μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (και παλμική μεταφορά σταγονιδίων).
- 95% Αργό + 5% Οξυγόνο – γενικής χρήσης όταν υπάρχει ανάγκη μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων. Το μέταλλο βάσης θα πρέπει να είναι ιδιαίτερα καθαρό από ανεπιθύμητες προσμίξεις λόγω της ισχυρής παρουσίας οξυγόνου.

Τριμερή μίγματα αερίων προστασίας

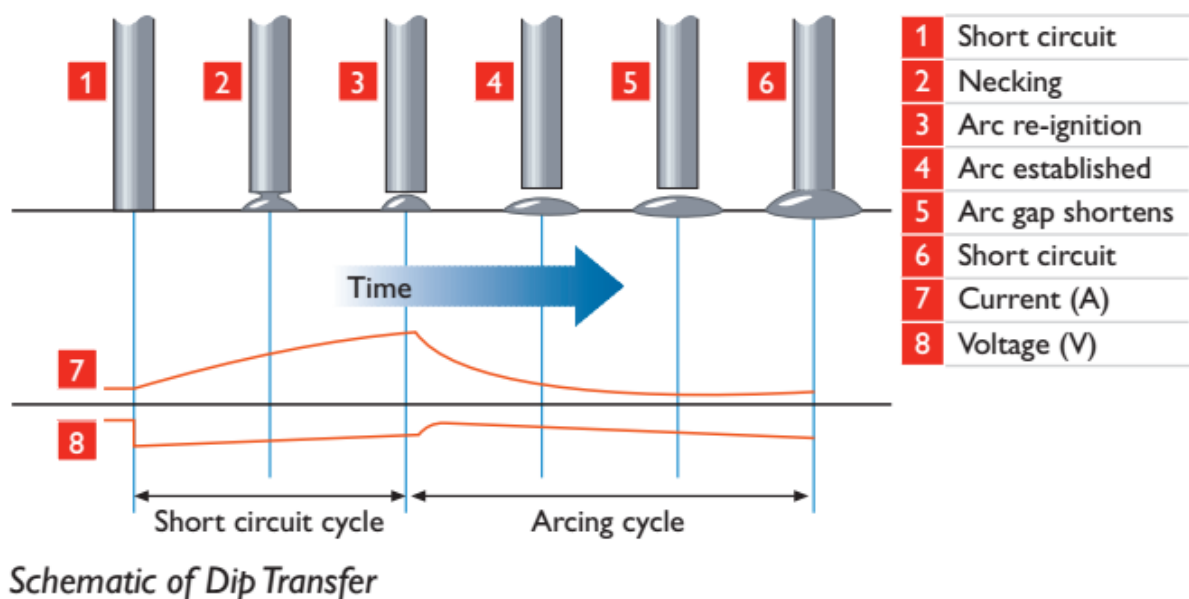
Τα πιο συνηθισμένα τριμερή μίγματα αερίων προστασίας είναι:

- 90% Ήλιο + 7.5% Αργό + 2.5% CO₂ – έχει πολύ διαδεδομένη χρήση για την επίτευξη μεταφοράς με βραχυκύκλωση σε ανοξείδωτους χάλυβες. Η υψηλή θερμική αγωγιμότητα του Ηλίου προσφέρει επίπεδη ραφή και πολύ καλή τήξη των μετάλλων. Μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για την παλμική μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων στην περίπτωση των ανοξείδωτων χαλύβων ή σε νικελιούχα κράματα (τουλάχιστον 1.6mm).
- 55% Ήλιο + 42.5% Αργό + 2.5% CO₂ – μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μεταφορά με βραχυκύκλωση, με τη μορφή σταγονιδίων και για παλμική μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων.
- 38% Ήλιο + 65% Αργό + 7% CO₂ – χρησιμοποιείται συνήθως για συγκολλήσεις με μεταφορά με βραχυκύκλωση σε χαμηλής και μέσης κραμάτωσης χάλυβες.
- 90% Αργό + 8% CO₂ + 2% Οξυγόνο – χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις με μεταφορά με βραχυκύκλωση, με σταγονίδια και με παλμική μεταφορά με σταγονίδια, σε ανθρακούχους χάλυβες. Το υψηλό ποσοστό ενεργών αερίων συμβάλει στη σημαντική μείωση των εκτοξεύσεων.

1.2.4 Μεταφορά του τηγμένου μετάλλου προσθήκης (Transfer Mode) [3], [6], [9], [15], [16], [17]

Μεταφορά με βύθιση ή βραχυκύκλωση (Short-Circuiting Transfer)

Κατά τη μέθοδο αυτή, η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης γίνεται με μικρά, επαναλαμβανόμενα βραχυκυκλώματα, που συμβαίνουν όταν το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο έρχεται σε άμεση επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Σε αυτόν τον τρόπο μεταφοράς, δημιουργείται σχετικά μικρή λίμνη συγκόλλησης, που στερεοποιείται γρήγορα. Τα παραπάνω καθιστούν τη μεταφορά με βραχυκύκλωση ιδανική για συγκόλληση τεμαχίων με μικρό πάχος, σε όλες τις θέσεις συγκόλλησης καθώς και για συγκόλληση τεμαχίων με μεγάλο διάκενο. Η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης γίνεται μόνο όταν το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης. Το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη συγκόλλησης 20 έως 200 φορές ανά δευτερόλεπτο.



Εικόνα 1.10 Επεξήγηση της μεταφοράς με βύθιση

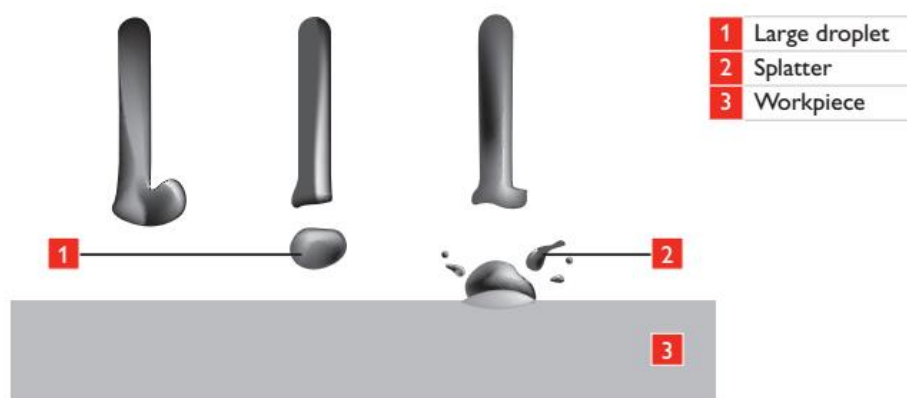
Όταν το ηλεκτρόδιο έρχεται σε επαφή με τη λίμνη της συγκόλλησης, κλείνει το κύκλωμα και έχουμε αύξηση της έντασης του ρεύματος. Η αύξηση αυτή οδηγεί σε αύξηση της θερμοκρασίας λόγω της αντίστασης του ηλεκτροδίου, που οδηγεί στην τήξη της άκρης του ηλεκτροδίου. Όταν το τηγμένο μέταλλο αποκολλάται από την άκρη του ηλεκτροδίου, έχουμε εκκίνηση του ηλεκτρικού τόξου. Ο ρυθμός αύξησης της έντασης του ρεύματος πρέπει να είναι αρκετά υψηλός, έτσι ώστε να έχουμε επαρκή θέρμανση του ηλεκτροδίου για να επιτευχθεί η τήξη του, αλλά και αρκετά χαμηλός έτσι ώστε να αποφύγουμε εκτεταμένες ανεπιθύμητες εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου που προκύπτουν από την ταχεία αποκόλληση του τηγμένου μετάλλου από την άκρη του ηλεκτροδίου. Η ρυθμός αύξησης της έντασης του ηλεκτρικού ρεύματος ελέγχεται από την προσαρμογή της επαγωγής της μηχανής της συγκόλλησης. Η ιδανική ρύθμιση της επαγωγής εξαρτάται τόσο από τη συνολική αντίσταση του κυκλώματος της συγκόλλησης, όσο και από τη θερμοκρασία τήξης του ηλεκτροδίου. Όταν αποκαθίσταται το ηλεκτρικό τόξο, δημιουργείται βραχυκύκλωμα, η άκρη του ηλεκτροδίου τήκεται, και το ηλεκτρόδιο τροφοδοτείται για τη δημιουργία του επόμενου βραχυκυκλώματος. Η τάση του κυκλώματος πρέπει να είναι αρκετά χαμηλή έτσι ώστε να μην έχουμε αποκόλληση της τηγμένης άκρης αν αυτή δεν έρθει σε επαφή με τη λίμνη της συγκόλλησης.

Παρόλο που η μεταφορά του μετάλλου προσθήκης λαμβάνει χώρα μόνο κατά τη διάρκεια του βραχυκυκλώματος, η σύσταση του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται έχει σημαντικές επιπτώσεις στην επιφανειακή τάση του τηγμένου μετάλλου. Το μέγεθος της σταγόνας αλλά και η διάρκεια του βραχυκυκλώματος εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σύσταση του αερίου προστασίας. Επίσης το είδος του αερίου προστασίας που χρησιμοποιείται, επηρεάζει τα ποιοτικά χαρακτηριστικά του ηλεκτρικού τόξου, καθώς και τη μέγιστη διείσδυση του τηγμένου μετάλλου που επιτυγχάνεται. Η χρήση 100% διοξειδίου του άνθρακα ως αέριο προστασίας οδηγεί σε εκτεταμένη παρουσία εκτοξεύσεων αλλά σε πολύ καλή διείσδυση, ενώ η χρήση μίγματος αργού – διοξειδίου του άνθρακα ως αέριο προστασίας μπορεί να συμβιβάσει την έκταση των εκτοξεύσεων με την επίτευξη ικανοποιητικής διείσδυσης συγκόλλησης. Η προσθήκη ηλίου (He) στο μίγμα αυτό μπορεί να αυξήσει τη διείσδυση της συγκόλλησης σε μη σιδηρούχα μέταλλα και να αυξήσει το ποσοστό της αραίωσης του μετάλλου βάσης στο μέταλλο της συγκόλλησης.

Μεταφορά με σταγόνες (Globular Transfer)

Στην περίπτωση αυτή η μεταφορά του μετάλλου του ηλεκτροδίου γίνεται με τη μορφή μεγάλων σταγόνων που ακολουθούν τη «διεύθυνση» του ηλεκτρικού τόξου. Η σταγόνες αυτές έχουν μεγαλύτερη διάμετρο από το ηλεκτρόδιο, και το γεγονός ότι επηρεάζονται έντονα από την βαρύτητα, καθιστά αυτή τη μέθοδο μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης, επιτυχημένη μόνο στην οριζόντια θέση.

Στο μεσαία εύρη ρεύματος, τα οποία είναι ελαφρά υψηλότερα από το ρεύμα που δημιουργεί μεταφορά με βραχυκύκλωση, είναι δυνατόν να επιτευχθεί η μεταφορά με τη μορφή σταγόνων όταν υπάρχει προστασία από ενδεικνύμενο αέριο προστασίας. Στην περίπτωση που το μήκος του ηλεκτρικού τόξου είναι μικρό (χαμηλή τάση), η σταγόνα μπορεί να έρθει σε επαφή με το δοκίμιο πριν την απομάκρυνσή της από το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο με αποτέλεσμα να υπάρξει βραχυκύκλωμα και η άμεση αποσύνθεσή της να προκαλέσει εκτοξεύσεις τηγμένου μετάλλου προσθήκης. Επομένως πρέπει το μήκος του ηλεκτρικού τόξου να είναι επαρκές προκειμένου να εξασφαλίζεται η πλήρης αποκόλληση της σταγόνας από το καταναλισκόμενο ηλεκτρόδιο προτού έρθει σε επαφή με την επιφάνεια της λίμνης της συγκόλλησης. Παρόλα αυτά, οι πολύ υψηλές τάσεις μπορεί να οδηγήσουν σε ατελή τήξη, σε μικρό βάθος διείσδυσης και επιφανειακή εναπόθεση (επιφανειακή ενίσχυση) άρα τελικά σε μη αποδεκτές συγκολλήσεις.



Schematic of Globular Transfer

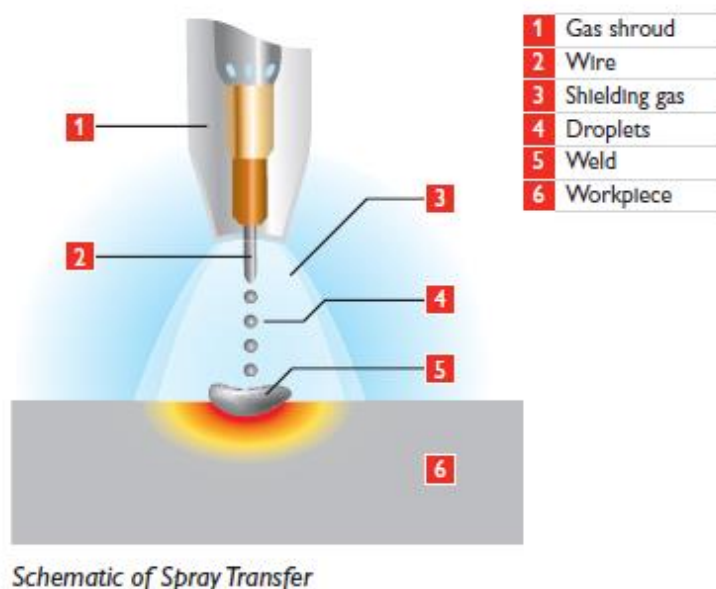
Εικόνα 1.11 Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς με τη μορφή σταγόνων

Όταν χρησιμοποιείται διοξείδιο του άνθρακα για αέριο προστασίας και οι συνθήκες έντασης και τάση του ηλεκτρικού ρεύματος είναι αρκετά υψηλότερες από αυτές που απαιτούνται για

μεταφορά με βραχυκύκλωση, παρουσιάζεται μεταφορά με σταγόνες η τροχιά των οποίων δεν είναι παράλληλη στο ηλεκτρικό τόξο. Η μη παράλληλη μεταφορά επηρεάζεται από ηλεκτρομαγνητικές δυνάμεις που αναπτύσσονται στην περιοχή της λίμνης της συγκόλλησης λόγω του ηλεκτρικού ρεύματος. Με τη χρήση του διοξειδίου του άνθρακα το ρεύμα της συγκόλλησης επάγεται μέσω της τηγμένης σταγόνας και το ιονισμένο αέριο που περικλείει τη συγκόλληση δεν επηρεάζει την άκρη του ηλεκτροδίου. Η παρουσία εκτεταμένων εκτοξεύσεων οδηγεί στον αποκλεισμό του διοξειδίου του άνθρακα για πολλές βιομηχανικές εφαρμογές.

Μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων (Spray Transfer)

Στην περίπτωση μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης με τη μορφή σταγονιδίων, υπάρχει επί της ουσίας μεταφορά του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή μικρών σταγονιδίων τα οποία έχουν τροχιά παράλληλη στη διεύθυνση του ηλεκτρικού τόξου, ενώ η διάμετρος των σταγονιδίων είναι αρκετά μικρότερη από τη διάμετρο του ηλεκτροδίου. Στη συγκεκριμένη μορφή μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, αποφεύγεται πλήρως η πιθανότητα βραχυκύκλωσης, επομένως το ηλεκτρικό τόξο είναι πολύ σταθερό και έχουμε πλήρη αποφυγή εκτοξεύσεων. Βασική προϋπόθεση για την επίτευξη της μεταφοράς με τη μορφή σταγονιδίων, είναι η χρήση πηγής συνεχούς ρεύματος (DC) με θετικό πόλο το ηλεκτρόδιο καθώς και το ότι η τιμή του ρεύματος και της τάσης θα πρέπει να βρίσκονται πάνω από κάποια όρια, υψηλότερα από αυτά που απαιτούνται για τη μεταφορά με τη μορφή σταγόνων. Αυτό συνεπάγεται ότι η ενέργεια που μεταφέρεται στη συγκόλληση είναι αρκετά υψηλή, οπότε αυτός ο τρόπος μεταφοράς του μετάλλου προσθήκης ενδείκνυται για ελάσματα πάχους τουλάχιστον 5 mm. Επίσης η υψηλή ενέργεια συγκόλλησης οδηγεί σε μεγάλη λίμνη συγκόλλησης, άρα αυτός ο τρόπος μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, είναι αποτελεσματικός κυρίως στην οριζόντια θέση. Πρέπει να σημειωθεί ότι η σταθερότητα του ηλεκτρικού τόξου δεν μπορεί να επιτευχθεί με αέριο προστασίας καθαρό διοξείδιο του άνθρακα (100% CO₂). Το καταλληλότερο αέριο προστασίας είναι καθαρό αργό (100% Ar), και προτιμότερο είναι μίγμα αργού – διοξειδίου του άνθρακα (όχι περισσότερο από 25% CO₂).



Εικόνα 1.12 Σχηματική αναπαράσταση μεταφοράς με τη μορφή σταγονιδίων

Αυτή η μέθοδος μεταφοράς μετάλλου προσθήκης χρησιμοποιείται για συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξειδωτού χάλυβα όπου το σύνηθες αέριο προστασίας είναι το μίγμα αργού – διοξειδίου του άνθρακα. Η επίτευξη της μεταφοράς μετάλλου προσθήκης με τη μορφή

σταγονιδίων είναι δυνατή και σε χαμηλότερες τιμές έντασης και τάσης του ρεύματος, αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο με μικρότερη διάμετρο.

Κατ' αυτόν τον τρόπο μεταφοράς τηγμένου μετάλλου, επιτυγχάνεται συνήθως η μεγαλύτερη παραγωγικότητα της μεθόδου GMAW. Μεγάλο ρόλο στη μεταφορά με σταγονίδια παίζει η πολικότητα της συγκόλλησης. Η μεγάλη πλειοψηφία των συγκολλήσεων GMAW γίνεται με Συνεχές Ρεύμα και Θετικό Ηλεκτρόδιο (DCEP). Σε αυτήν την περίπτωση τα ηλεκτρόνια οδεύουν προς το ηλεκτρόδιο προκαλώντας τη θέρμανση και την τήξη του. Παράλληλα μέσα στο τόξο, τα θετικά ιόντα οδεύουν προς το τεμάχιο συγκόλλησης. Κατά την κίνησή τους αυτή, τα ιόντα αερίου προκαλούν την επιτάχυνση των σταγόνων μετάλλου που οδεύουν προς τη συγκόλληση, με αποτέλεσμα να πραγματοποιείται συγκόλληση με μεγάλη διείδυση.

Οι περιορισμοί αυτής της μεθόδου που αφορούν το ελάχιστο πάχος ελάσματος και τη θέση της συγκόλλησης μπορούν να ξεπεραστούν με τη χρήση ειδικά σχεδιασμένων πηγών ρεύματος. Αυτές οι μηχανές συγκόλλησης μπορούν και δημιουργούν ελεγχόμενες κυματομορφές και συχνότητες ρεύματος που δημιουργούν παλμούς μεταφοράς των σταγονιδίων στη λίμνη της συγκόλλησης.

Παλμική μεταφορά με σταγονίδια (Pulsed Spray Transfer)

Η παλμική μεταφορά με σταγονίδια χρησιμοποιείται συνήθως για συγκολλήσεις αλουμινίου και ανοξείδωτων χαλύβων, αλλά και για απλούς ανθρακούχους χάλυβες. Η μέθοδος ελέγχου της μεταφοράς των σταγονιδίων μέσω παλμών ρεύματος (30 – 300 Hz) καθιστά δυνατή τη μεταφορά με σταγονίδια ακόμα και με πολύ ήπιες συνθήκες συγκόλλησης (ένταση ρεύματος, τάση ρεύματος). Ο τρόπος αυτός παρέχει σταθερό ηλεκτρικό τόξο με απουσία εκτοξεύσεων, σε αντίθεση με τη μέθοδο μεταφοράς με βραχυκύκλωση που γίνεται σε αντίστοιχες συνθήκες. Οι παλμοί οδηγούν στην αποκόλληση των σταγονιδίων από το ηλεκτρόδιο με την ταχύτητα κατανάλωσης του ίδιου του ηλεκτροδίου. Με τον τρόπο αυτό αποφεύγονται οι βραχυκυκλώσεις και η δημιουργία εκτοξεύσεων. Οι σύγχρονες συσκευές παρέχουν τη δυνατότητα να εκτιμηθεί η μορφή και η συχνότητα του παλμού που είναι απαραίτητος ανάλογα με την επιλογή του ηλεκτροδίου, του προς συγκόλληση υλικού και του μίγματος αερίου προστασίας, προκειμένου να εξασφαλιστεί το επαρκές μήκος ηλεκτρικού τόξου, για την ομαλή διεξαγωγή της συγκόλλησης.

Τα πλεονεκτήματα που εξασφαλίζονται από την μέθοδο της παλμικής μεταφοράς με σταγονίδια είναι:

- Η διαδικασία της συγκόλλησης είναι πλήρως ελεγχόμενη και χωρίς εκτοξεύσεις.
- Η δυνατότητα να υπάρχει μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων σε πολύ ήπιες συνθήκες συγκόλλησης που είναι ιδιαιτέρως κατάλληλη για τη συγκόλληση υλικών όπως ανοξείδωτος χάλυβας ή αλουμίνιο. Γίνεται δυνατή η συγκόλληση λεπτών δοκιμίων ή συγκόλληση σε θέσεις εκτός της οριζόντιας, που θα μπορούσαν να επιτευχθούν μόνο με τη μέθοδο της βραχυκύκλωσης.
- Σε σύγκριση με τη απλή μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων, η παλμική μεταφορά επιτυγχάνει καλύτερη διείδυση.
- Παρέχεται η δυνατότητα χρήσης ηλεκτροδίου μεγαλύτερης διαμέτρου (ευκολότερη παροχή, χαμηλότερο κόστος). Αυτό είναι ιδιαιτέρως χρήσιμο στην περίπτωση συγκόλλησης αλουμινίου, αφού τα ηλεκτρόδια αλουμινίου είναι δυσκολότερο να χρησιμοποιηθούν από τις μηχανές MIG σε χαμηλότερες διαμέτρους.

- Έρευνες έχουν δείξει ότι η ελεγχόμενη αποκόλληση των σταγονιδίων από το τηκόμενο ηλεκτρόδιο που επιτυγχάνεται με αυτή τη μέθοδο, μειώνει τις πιθανότητες υπερθέρμανσης και εξάτμισης των σταγονιδίων με αποτέλεσμα τη μείωση των παραγόμενων καυσαερίων.

1.2.5 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου [3], [12]

Τα πιο συνηθισμένα σφάλματα που παρουσιάζονται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο GMAW, είναι η αστάθεια του ηλεκτρικού τόξου, οι πόροι, η ατελής τήξη, η ατελής διείσδυση, η υπερβολική διείσδυση και οι εκτοξεύσεις. Πιο συγκεκριμένα αναλύονται παρακάτω.

Αστάθεια έναυσης του ηλεκτρικού τόξου (arc start instability): Το σφάλμα αυτού του είδους οδηγεί σε εκτεταμένη παρουσία τμημάτων του ηλεκτροδίου με τη μορφή εκτοξεύσεων στη ραφή της συγκόλλησης. Αυτό συμβαίνει διότι παρόλο που το ηλεκτρικό τόξο δεν έχει ξεκινήσει, το ηλεκτρόδιο που διαρρέεται από ρεύμα έρχεται σε επαφή με το προς συγκόλληση τεμάχιο και θερμαίνεται ακαριαία λόγω βραχυκυκλώματος.

Πόροι (porosity): Συχνό σφάλμα της μεθόδου GMAW είναι η ύπαρξη πόρων στο εσωτερικό, κυρίως των τελικών ραφών. Η δημιουργία του πορώδους οφείλεται στον εγκλεισμό αερίων που παράγονται από την τήξη των μετάλλων (κυρίως αέρια H_2 , N_2). Η κύρια αιτία δημιουργίας πόρων στο εσωτερικό των ραφών είναι η ανεπαρκής κάλυψη της λίμνης συγκόλλησης από το αέριο προστασίας. Η αποφυγή της ύπαρξης πόρων στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης γίνεται με τη σωστή επιλογή του αερίου προστασίας, αλλά ταυτόχρονα με τον επιμελή έλεγχο και τη σωστή συντήρηση του συστήματος παροχής του αερίου προστασίας.

Ατελής Τήξη (incomplete fusion): Είναι επί της ουσίας το φαινόμενο κατά το οποίο δεν έχει γίνει πλήρης σύντηξη του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης και οφείλεται κυρίως σε ακαθαρσίες της επιφάνειας και σε ανεπαρκή πρόσδοση θερμότητας στην περιοχή. Ο σωστός καθαρισμός της προς συγκόλληση επιφάνειας καθώς και η σωστή ρύθμιση της έντασης του ρεύματος της συγκόλλησης και η ρύθμιση της ταχύτητας του πυρσού, μπορούν να συντελέσουν στην εξάλειψη αυτού του είδους της ατέλει.

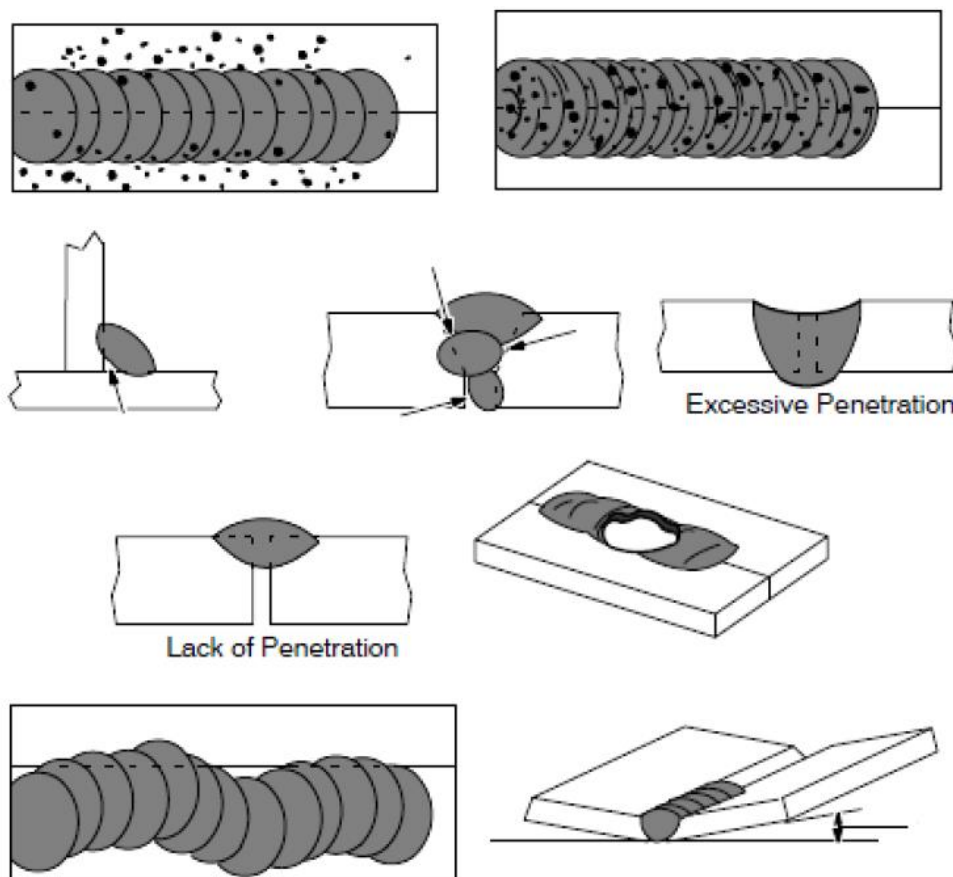
Ατελής Διείσδυση (lack of penetration): Είναι η ο ανεπαρκής βαθμός τήξης και σύνδεσης του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης. Η κύρια αιτία εμφάνισης αυτού του είδους της ατέλει είναι η ακατάλληλη προετοιμασία της συμβολής της συγκόλλησης, δηλαδή η ελλιπής προετοιμασία των τεμαχίων, η λανθασμένη ρύθμιση του διάκενου μεταξύ των ελασμάτων, ή η ασυμβατότητα μεταξύ πάχους των προς συγκόλληση ελασμάτων και εφαρμοζόμενης μεθόδου. Η διατήρηση της σωστής γωνίας του πυρσού και της κατάλληλης έκτασης του ηλεκτροδίου (Electrode Extension) είναι μέτρα αποφυγής της ατελούς διείσδυσης. Η πρόσδοση περισσότερης θερμότητας συγκόλλησης, μέσω της αύξησης των παραμέτρων του ρεύματος και μείωσης της ταχύτητας μπορεί να αποτελέσει μια ακόμα λύση στο φαινόμενο της ατελούς τήξης.

Υπερβολική Διείσδυση (excessive penetration): Εμφανίζεται σε περιπτώσεις υπερβολικής πρόσδοσης θερμότητας στο προς συγκόλληση τεμάχιο. Αντιμετωπίζεται με χαμηλότερες τιμές των παραμέτρων του ρεύματος και αύξηση της ταχύτητας της συγκόλλησης.

Εκτοξεύσεις (spatter): Η υψηλή ταχύτητα παροχής του ηλεκτροδίου καθώς και η υψηλή τάση του τόξου είναι βασικές αιτίες δημιουργίας των εκτοξεύσεων. Η έκταση του ηλεκτροδίου συμβάλει στη δημιουργία ή όχι των εκτοξεύσεων, ανάλογα με τις συνθήκες της συγκόλλησης. Τέλος η ανεπαρκής παροχή αερίου προστασίας καθώς και ο ελλιπής καθαρισμός της επιφάνειας της συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσουν σε εκτοξεύσεις.

Κάποια επιπλέον σφάλματα που συναντώνται στις συγκολλήσεις GMAW είναι η ανώμαλη επιφάνεια της όψης της ραφής, οι παραμορφώσεις και το «τρέξιμο» του μετάλλου.

Η ανώμαλη επιφάνεια της όψης της ραφής οφείλεται στο ότι το τηγμένο μέταλλο δεν εναποτίθεται παράλληλα με τη διεύθυνση της συγκόλλησης με αποτέλεσμα να μην καλύπτει όλη τη ραφή. Αυτό το σφάλμα οφείλεται κυρίως σε ασταθή κίνηση του πυρσού της συγκόλλησης σε περιπτώσεις χειροκίνητων εφαρμογών της μεθόδου και σε μεγάλη έκταση του ηλεκτροδίου. Οι παραμορφώσεις προκαλούνται από τη συστολή του μετάλλου συγκόλλησης η οποία έχει σαν αποτέλεσμα τη μετακίνηση του τεμαχίου σε σχέση με την αρχική του θέση. Οι αυξομειώσεις της θερμοκρασίας κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης είναι η κύρια αιτία τέτοιου είδους σφαλμάτων. Για την αντιμετώπιση των παραμορφώσεων απαιτείται η πάκτωση των προς συγκόλληση ελασμάτων και η ένωση των τεμαχίων με πόντες μετά το πέρασμα της ρίζας. Το τρέξιμο του μετάλλου είναι οι ασυνέχειες υλικού πάνω στη ραφή και έχει συνήθως τη μορφή οπής. Η ατέλεια αυτή οφείλεται σε υπερβολική τήξη του μετάλλου συγκόλλησης.



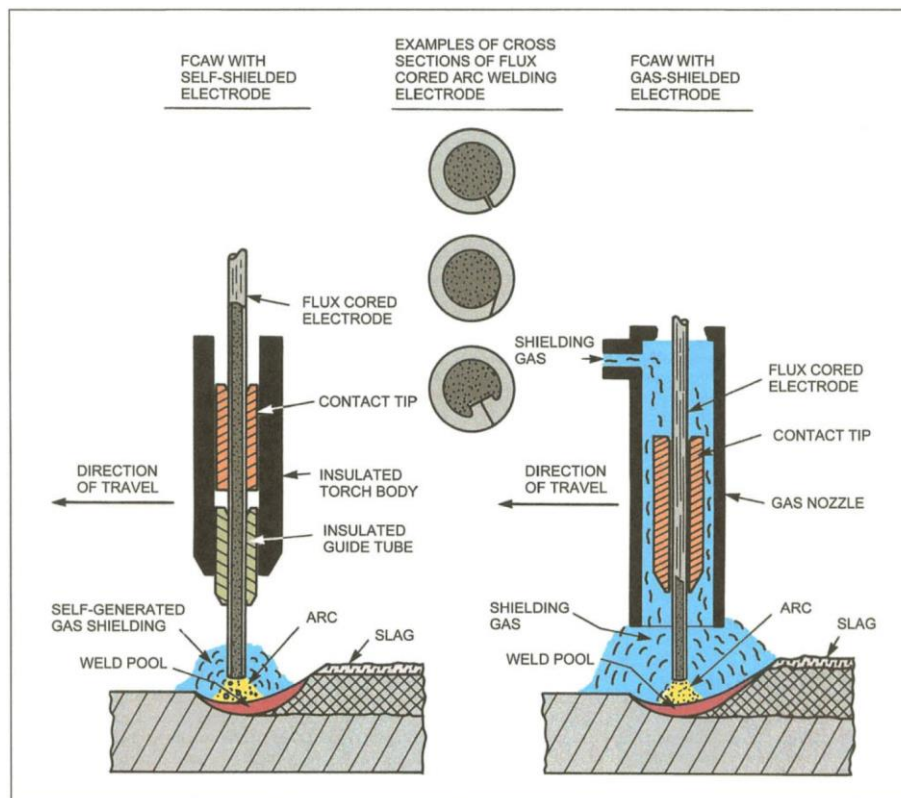
Εικόνα 1.13 Σχηματική παρουσίαση των σφαλμάτων εκτοξεύσεων, πόρων, ατελούς τήξης, ατελούς ή υπερβολικής διείσδυσης, τρεξίματος του μετάλλου, ανώμαλης επιφάνειας όψης ραφής και παραμορφώσεων

1.3 Συγκόλληση Τόξου με χρήση Σωληνοειδών Ηλεκτροδίων (Flux Cored Arc Welding – FCAW)

1.3.1 Γενική περιγραφή της μεθόδου FCAW [3], [6], [10], [19]

Η μέθοδος FCAW εκμεταλλεύεται τη θερμότητα ενός ηλεκτρικού τόξου έτσι ώστε να επιτευχθεί η συνένωση της συμβολής του μετάλλου βάσης και του μετάλλου προσθήκης. Είναι μια πολύ αποτελεσματική μέθοδος που μπορεί να προσαρμοστεί σε ημι-αυτοματοποιημένες ή πλήρως αυτοματοποιημένες διατάξεις συγκόλλησης και έχει σαν αποτέλεσμα πολύ καλής

ποιότητας συγκολλήσεις και ταυτόχρονα πολύ υψηλό ρυθμό εναπόθεσης υλικού. Το ηλεκτρικό τόξο δημιουργείται μεταξύ ενός συνεχώς τροφοδοτούμενου ηλεκτροδίου και του προς συγκόλληση ελάσματος. Η μέθοδος FCAW είναι επί της ουσίας μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW όπου το τηκόμενο ηλεκτρόδιο έχει τη μορφή ενός μεταλλικού σωλήνα που περιέχει στο εσωτερικό του σκόνη συλλιπάσματος. Η χρήση του συλλιπάσματος είναι παρόμοια με εκείνη της μεθόδου SMAW (συγκόλληση βυθισμένου τόξου), δηλαδή η προστασία της λίκνης της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Διαφορά των μεθόδων είναι ότι στη μέθοδο FCAW η σκόνη περιέχεται στο ηλεκτρόδιο, ενώ στη μέθοδο SMAW η σκόνη συλλιπάσματος περικλείει το τηκόμενο ηλεκτρόδιο. Στην περιοχή του τόξου υπάρχει δυνατότητα να παρέχεται αέριο μίγμα προστασίας για την προστασία του λουτρού της συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα. Η χρήση αερίου προστασίας στη συγκεκριμένη μέθοδο είναι προαιρετική και το αν χρησιμοποιείται αέριο ή όχι δημιουργεί δύο παραλλαγές συγκολλήσεων FCAW.



Εικόνα 1.14 Απεικόνιση αριστερά: S-FCAW. Απεικόνιση Δεξιά: G-FCAW

1. Αυτοπροστατευόμενη συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια, S-FCAW (self-shielded FCAW)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιείται για κατασκευές εξωτερικού χώρου, όπου η παρουσία ανέμων και εξωγενών παραγόντων θα μπορούσε να επηρεάσει ή ακόμα και να διακόψει την παροχή αερίου προστασίας. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης με τη μέθοδο S-FCAW παρέχεται πρόσθετη προστασία λόγω της αποσύνθεσης κάποιων στοιχείων του πυρήνα του ηλεκτροδίου που οφείλεται στις υψηλές θερμοκρασίες που αναπτύσσονται από το τόξο της συγκόλλησης. Οι ατμοί που δημιουργούνται από την εξάτμιση αυτών των στοιχείων μετατοπίζουν ακαριαία τον ατμοσφαιρικό αέρα από την περιοχή γύρω από το ηλεκτρικό τόξο. Επιπλέον το ηλεκτρόδιο περιλαμβάνει μεγάλες ποσότητες αποξειδωτικών και απονιτρίτικών μέσων (deoxidizers, denitrifiers), το οποία αντιδρούν με τα ανεπιθύμητα στοιχεία που εν δυνάμει μπορούν να επηρεάσουν τη λίκνη της συγκόλλησης. Τέλος, ένα στρώμα σκουριάς που δημιουργείται από τα στοιχεία που περιέχονται στο ηλεκτρόδιο προστατεύουν το προς στερεοποίηση μίγμα από τον περιβάλλοντα ατμοσφαιρικό αέρα της συγκόλλησης.

2. Συγκόλληση με σωληνοειδή ηλεκτρόδια και χρήση αερίου προστασίας, G-FCAW (gas-shielded FCAW)

Η μέθοδος αυτή χρησιμοποιεί σωληνοειδή ηλεκτρόδια που περιέχουν σκόνη συλλιπάσματος, καθώς και αέριο προστασίας, έχει δηλαδή διπλή προστασία (dual shield). Στη μέθοδο G-FCAW, το αέριο προστασίας (CO_2 ή μίγμα $\text{Ar} - \text{CO}_2$) προστατεύει τη λίμνη της συγκόλλησης από το οξυγόνο και το άζωτο που περιέχονται στον ατμοσφαιρικό αέρα, σχηματίζοντας ένα «νέφος» αερίου γύρω από το ηλεκτρικό τόξο και πάνω από τη λίμνη συγκόλλησης. Κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης δεν υπάρχει ανάγκη απαζώτωσης (απομάκρυνσης του αζώτου) του μετάλλου συγκόλλησης επειδή ο ατμοσφαιρικός αέρας που είναι πλούσιος σε άζωτο έχει αποκλειστεί από το αέριο προστασίας. Παρόλα αυτά υπάρχει πιθανότητα σχηματισμού οξυγόνου από τη διάσπαση του CO_2 σε οξυγόνο και μονοξείδιο του άνθρακα. Στην περίπτωση αυτή προβλέπεται η χρήση ηλεκτροδίων που η σύστασή τους περιέχει αποξειδωτικά μέσα τα οποία αντιδρούν με τις μικρές ποσότητες οξυγόνου που έχουν προκύψει στο αέριο προστασίας.

1.3.2 Ηλεκτρόδια [3], [9], [13], [19]

Όπως έχει αναφερθεί το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιείται στη μέθοδο FCAW, είναι σωληνοειδές και έχει περίβλημα που αποτελείται από μέταλλο προσθήκης και πυρήνα που περιέχει διάφορα συστατικά σε μορφή σκόνης. Τόσο το υλικό του περιβλήματος όσο και η σκόνη του πυρήνα συμβάλλουν στο επιθυμητό αποτέλεσμα, δηλαδή στα επιθυμητά χαρακτηριστικά χρήσης της συγκόλλησης.

Οι κύριες λειτουργίες των συστατικών της σκόνης του πυρήνα του ηλεκτροδίου είναι οι ακόλουθες:

1. Προσδίδουν τα μηχανικά, μεταλλουργικά, και αντισκωριακά χαρακτηριστικά του μετάλλου συγκόλλησης, επηρεάζοντας την τελική χημική του σύσταση.
2. Επηρεάζουν και «ρυθμίζουν» την ορθότητα του μετάλλου συγκόλλησης, προστατεύοντας τη λίμνη της συγκόλλησης (στην περίπτωση της S-FCAW) από το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας.
3. Συμβάλουν στον καθαρισμό της λίμνης της συγκόλλησης από ακαθαρσίες και ανεπιθύμητες προσμίξεις, αντιδρώντας χημικά με αυτές.
4. Δημιουργούν ένα στρώμα επιφανειακής σκουριάς που προστατεύει το προς στερεοποίηση μέταλλο συγκόλλησης από τον ατμοσφαιρικό αέρα.
5. Σταθεροποιούν το τόξο της συγκόλλησης δημιουργώντας ένα αγωγίμο πεδίο που συμβάλει στην ορθή γεωμετρία της συγκόλλησης σε όλες τις θέσεις.

Κάποια χαρακτηριστικά στοιχεία που μπορούν να περιλαμβάνονται στη σκόνη του πυρήνα ενός ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW είναι τα παρακάτω.

Τιτάνιο, Αλουμίνιο, Ζιρκόνιο, Πυρίτιο, Μαγγάνιο: είναι στοιχεία που χρησιμοποιούνται στη σκόνη του πυρήνα των σωληνοειδών ηλεκτροδίων προκειμένου να απομακρυνθεί το οξυγόνο και το άζωτο της ατμόσφαιρας.

Νικέλιο, Μολυβδαίνιο, Χρώμιο, Βανάδιο: τα στοιχεία αυτά εισέρχονται σαν στοιχεία κραμάτων στη λίμνη της συγκόλλησης και συνεισφέρουν στη μηχανική αντοχή, στην αντοχή στη διάβρωση και στην αύξηση της σκληρότητας του μετάλλου συγκόλλησης.

Κάλιο, Νάτριο: η εισαγωγή αυτών των στοιχείων στη σκόνη του πυρήνα του ηλεκτροδίου σταθεροποιεί το ηλεκτρικό τόξο και σχηματίζει προστατευτική σκουριά στη ραφή της συγκόλλησης.

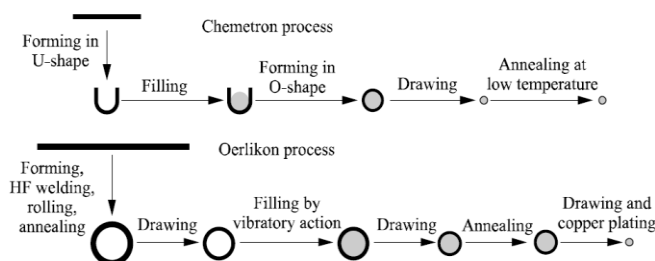
Βόριο: η χρήση αυτού του στοιχείου είναι απαραίτητη αν απαιτείται λεπτόκοκκη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης.

Ο παρακάτω πίνακας περιλαμβάνει τα περισσότερα στοιχεία που μπορούν να συμπεριληφθούν στη σκόνη του πυρήνα του ηλεκτροδίου, καθώς και τις ιδιότητες που προσδίδουν.

Πίνακας 1.3 Στοιχεία που περιλαμβάνονται στη σκόνη του πυρήνα των ηλεκτροδίων της μεθόδου FCAW, μορφή υπό την οποία παρουσιάζονται και σκοπός χρήσης τους.

Element	Usually Present As	Purpose in Weld
Aluminum	Metal powder	Deoxidize and denitrify
Boron	Ferroboron	Grain refinement
Calcium	Minerals such as fluorspar (CaF_2) and limestone (CaCO_3)	Provide shielding and form slag
Carbon	Element in ferroalloys such as ferromanganese	Increase hardness and strength
Chromium	Ferroalloy or metal powder	Alloying to improve creep resistance, hardness, strength, and corrosion resistance
Iron	Ferroalloys and iron powder, sheath	Alloy matrix in iron-base deposits, alloy in nickel-base and other nonferrous deposits
Manganese	Ferroalloy such as ferromanganese or as metal powder	Deoxidize; prevent hot shortness by combining with sulfur to form manganese sulfide; increase hardness and strength; form slag
Molybdenum	Ferroalloy	Alloying to increase hardness and strength; in austenitic stainless steels to increase resistance to pitting-type corrosion
Nickel	Metal powder	Alloying to improve hardness, strength, toughness and corrosion resistance
Potassium	Minerals such as potassium-bearing feldspars and silicates in frits	Stabilize the arc and form slag
Silicon	Ferroalloy such as ferrosilicon, or silicomanganese; mineral silicates such as feldspar	Deoxidize and form slag
Sodium	Minerals such as sodium-bearing feldspars and silicates in frits	Stabilize the arc and form slag
Vanadium	Oxide or metal powder	Increase strength
Titanium	Ferroalloy such as ferrotitanium; in mineral, rutile (titanium dioxide)	Deoxidize and denitrify; form slag; stabilize carbon in some stainless steels
Zirconium	Oxide or metal powder	Deoxidize and denitrify; form slag

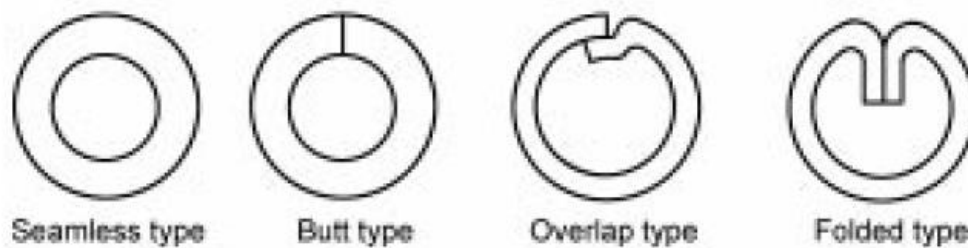
Η αρχική μέθοδος παρασκευής των ηλεκτροδίων ήταν η πλήρωση ενός μεταλλικού σωλήνα μεγαλύτερης διαμέτρου από την επιθυμητή με τη σκόνη του πυρήνα, και έπειτα μέσω της μεθόδου της ολκής επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάμετρος. Η πιο συνηθισμένη μέθοδος σήμερα είναι η μέθοδος διαμόρφωσης επίπεδης λωρίδας. Η μεταλλική λωρίδα εισέρχεται σε μια διάταξη με ράουλα και διαμορφώνεται αρχικά σε μορφή U. Η σκόνη του πυρήνα απλώνεται στο εσωτερικό της ήδη διαμορφωμένης λωρίδας και έπειτα κλείνεται σε μορφή σωλήνα.



Εικόνα 1.15 Μέθοδοι κατασκευής σωλινοειδών ηλεκτροδίων

Ο τρόπος οποίος εφαρμόζεται για να διαμορφωθεί ο τελικός σωλήνας διαφέρει αναλόγως με τον εξοπλισμό του κατασκευαστή αλλά και το είδος του ηλεκτροδίου που κατασκευάζεται. Μετά το κλείσιμο του σωλήνα μέσω διέλασης επιτυγχάνεται η επιθυμητή διάμετρος του

ηλεκτροδίου. Παρακάτω φαίνονται διάφορες διατομές ηλεκτροδίων ανάλογα με τον τρόπο κατασκευής



Εικόνα 1.16 Διαφοροποίηση διατομών σωληνοειδών ηλεκτροδίων

Τα ηλεκτρόδια της μεθόδου FCAW κατά AWS, για συγκολλήσεις ανθρακο-μαγνηιούχων χαλύβων, τυποποιούνται σύμφωνα με το παρακάτω πρότυπο:

$E\ x\ x\ T\ x - x$

- Το γράμμα E στην αρχή του τύπου υποδηλώνει την ύπαρξη ηλεκτροδίου
- Στη δεύτερη θέση εισάγεται ένας αριθμός που αντιστοιχεί στην αντοχή του ηλεκτροδίου σε εφελκυσμό, πολλαπλασιαζόμενος με έναν παράγοντα 10x που υποδεικνύει την αντοχή σε ksi.
- Στην τρίτη θέση εισάγεται ο αριθμός 0 ή 1 ανάλογα την θέση συγκόλλησης για την οποία ενδείκνυται το ηλεκτρόδιο. Ο αριθμός 0 αντιστοιχεί σε επίπεδες και οριζόντιες συγκολλήσεις ενώ η ο αριθμός 1 υποδηλώνει ότι το ηλεκτρόδιο μπορεί να χρησιμοποιηθεί σε όλες τις θέσεις.
- Ο χαρακτήρας T δείχνει ότι πρόκειται για σωληνοειδές ηλεκτρόδιο.
- Στην πέμπτη θέση εισάγεται ένας αριθμός μεταξύ 1, 4, 5, 6, 7, 8, 11, ή ο χαρακτήρας G, που υποδηλώνουν τις δυνατότητες χρήσης του ηλεκτροδίου δηλαδή το αέριο προστασίας και τη μορφή της σκουριάς που σχηματίζεται.
- Το τελευταίο ψηφίο καθορίζει τη χημική σύσταση του μετάλλου προσθήκης

1.3.3 Αέρια Προστασίας [3], [10], [17], [18]

Τα πιο συνηθισμένα αέρια προστασίας που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο FCAW είναι το CO₂ (διοξείδιο του άνθρακα) καθώς και μίγμα CO₂ – Ar (διοξείδιο του άνθρακα – αργό).

Διοξείδιο του άνθρακα

Το CO₂ χρησιμοποιείται ευρέως σαν αέριο προστασίας στις συγκολλήσεις με τη μέθοδο FCAW. Η χρήση του έχει σαν αποτέλεσμα συγκολλήσεις μεγάλης διεύθυνσης και το κόστος του είναι πολύ χαμηλότερο από τα διάφορα αέρια μίγματα. Το CO₂ είναι σχετικά αδρανές σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, ενώ όταν θερμαίνεται κατά τη συγκόλληση διασπάται σε CO (μονοξείδιο του άνθρακα) και O₂ (οξυγόνο). Μετά τη διάσπασή του, η περιβάλλουσα του τόξου ατμόσφαιρα περιέχει μια μετρήσιμη ποσότητα O₂ η οποία αντιδρά με τα μεταλλικά στοιχεία που περιέχονται στη λίμνη της συγκόλλησης. Η οξειδωτική τάση που παρουσιάζει η χρήση του CO₂ οδηγεί αναγκαστικά στη χρήση ηλεκτροδίων στον πυρήνα των οποίων περιέχονται αποξειδωτικά στοιχεία τα οποία εξουδετερώνουν την τάση αυτή. Επιπλέον, ο σίδηρος που περιέχεται στη λίμνη της συγκόλλησης αντιδρά με το CO₂, και δημιουργούνται οξείδια του σιδήρου και CO.

Τα αποτελέσματα που έχει η χρήση του CO₂ σαν αέριο προστασίας σε χάλυβες μέσης ή χαμηλής κραμάτωσης, είναι μοναδικά. Ανάλογα με το ποσοστό του περιεχόμενου άνθρακα του μετάλλου βάσης αλλά και του ηλεκτροδίου, η παρουσία του CO₂ μπορεί να λειτουργήσει είτε σαν ενανθρακωτικό μέσο είτε σαν μέτριας δράσης μέσο απομάκρυνσης του άνθρακα. Η αύξηση ή η μείωση του άνθρακα στο μέταλλο συγκόλλησης εξαρτάται από το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται στο μέταλλο βάσης και στο ηλεκτρόδιο. Έχει παρατηρηθεί ότι αν το ποσοστό του άνθρακα που περιέχεται στο μέταλλο συγκόλλησης είναι μικρότερο του 0.05%, τότε η λίμνη της συγκόλλησης θα τείνει να απορροφήσει άνθρακα από την προστατευτική ατμόσφαιρα του CO₂. Αντίθετα, εάν το ποσοστό του άνθρακα είναι μεγαλύτερο από 0.10% τότε η λίμνη της συγκόλλησης θα αποβάλλει μια ποσότητα του περιεχόμενου άνθρακα. Η αποβολή αυτή οφείλεται στο σχηματισμό του CO που λαμβάνει χώρα λόγω των οξειδωτικών χαρακτηριστικών που έχει το CO₂ σε υψηλές θερμοκρασίες.

Όταν συμβαίνει αυτή η αντίδραση το CO παγιδεύεται στη λίμνη της συγκόλλησης και μπορεί να δημιουργήσει ατέλειες με τη μορφή πόρων στην περιοχή της συγκόλλησης. Αυτό μπορεί να μειωθεί αισθητά αν χρησιμοποιηθεί ηλεκτρόδιο που περιέχει μεγάλες ποσότητες αποξειδωτικών μέσων στον πυρήνα του. Το οξυγόνο αντιδρά με τα στοιχεία αυτά και όχι με τον άνθρακα που περιέχεται στον προς συγκόλληση χάλυβα. Αυτή η αντίδραση έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία οξειδίων τα οποία επιπλέουν στην επιφάνεια της λίμνης της συγκόλλησης και δημιουργούν ένα στρώμα επιφανειακής σκουριάς που μπορεί εύκολα να αφαιρεθεί.

Μίγμα διοξειδίου του άνθρακα – αργού

Η χρήση μίγματος αερίου διοξειδίου του άνθρακα – αργού, εκμεταλλεύεται τα επιμέρους πλεονεκτήματα που μπορούν να προσφέρουν τα δύο αυτά αέρια. Όσο υψηλότερο είναι το ποσοστό του CO₂ στο αέριο προστασίας τόσο πιο αποτελεσματική θα είναι η μεταφορά αποξειδωτικών μέσων που περιέχονται στον πυρήνα του ηλεκτροδίου. Το αργό παρέχει προστασία και «κάλυψη» της λίμνης της συγκόλλησης σε όλες τις θερμοκρασίες που λαμβάνουν χώρα, αφού η επαρκής παροχή του στο αέριο μίγμα προστασίας εμποδίζει την οξείδωση του μετάλλου της συγκόλλησης.

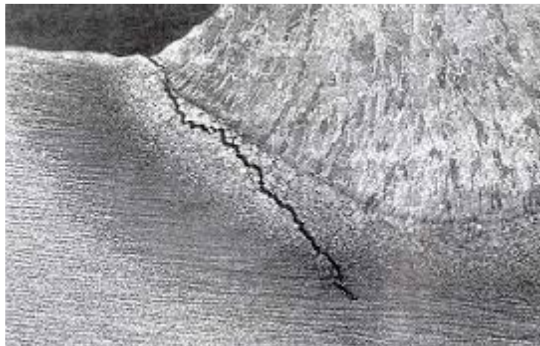
Το πιο σύνηθες μίγμα που χρησιμοποιείται στην G-FCAW είναι 75% αργό και 25% CO₂ (75/25). Αυτό το μίγμα οδηγεί στη δημιουργία τόξου μεταφοράς μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (spray transfer arc). Το μέταλλο συγκόλλησης που εναποτίθεται μέσω προστασίας αυτού του μίγματος, έχει μεγαλύτερη αντοχή σε εφελκυσμό και μεγαλύτερο όριο διαρροής από το μέταλλο συγκόλλησης που εναποτίθεται με αέριο προστασίας 100% CO₂. Αυτό συμβαίνει γιατί με τη χρήση του μίγματος (75/25) έχουμε μεταφορά μαγγανίου (Mn) και πυριτίου (Si) που παραμένουν σαν κραματικά στοιχεία στο μέταλλο συγκόλλησης, ενώ σε περίπτωση που θα χρησιμοποιούνταν 100% CO₂ σαν αέριο προστασίας, τα στοιχεία αυτά θα αντιδρούσαν με το οξυγόνο και θα απομακρύνονταν με τη μορφή οξειδίων από τη λίμνη της συγκόλλησης. Βέβαια αξίζει να σημειωθεί ότι ο συνδυασμός μίγματος (75/25) με ηλεκτρόδια που έχουν σχεδιαστεί για αέριο προστασίας 100% CO₂ μπορεί να οδηγήσει στην ύπαρξη μεγάλων ποσοτήτων Mn και Si στο μέταλλο συγκόλλησης, έτσι ώστε να αλλάξουν κατά πολύ οι αναμενόμενες μηχανικές του ιδιότητες. Επομένως, οι κατασκευαστές ηλεκτροδίων θα πρέπει να επισημαίνουν τις μηχανικές ιδιότητες των συγκολλήσεων που θα προκύψουν αναλόγως το είδος του προς συγκόλληση χάλυβα και του αερίου προστασίας που θα χρησιμοποιηθεί.

1.3.4 Τυπικά Σφάλματα της μεθόδου FCAW [3], [18]

Η μέθοδος FCAW, ως παραλλαγή της μεθόδου GMAW/MIG, εμφανίζει σφάλματα παρεμφερή με αυτά της δεύτερης μεθόδου. Χαρακτηριστικά παραδείγματα είναι οι πόροι, η ατελής τήξη, η ατελής ή η υπερβολική διεύθυνση.

Δύο σφάλματα που εμφανίζονται στη μέθοδο αυτή και οφείλονται στα αποκλειστικά χαρακτηριστικά της, είναι η ρωγματώσεις λόγω αυξημένης παρουσίας υδρογόνου, και οι ατέλειες τύπου «worm tracks».

Η ύπαρξη υδρογόνου στο μέταλλο συγκόλλησης μπορεί πολλές φορές να οδηγήσει σε ρωγμάτωση της ραφής είτε αμέσως μετά τη συγκόλληση, είτε σε διάρκεια μερικών ωρών. Η ύπαρξη υδρογόνου σε συνδυασμό με λανθασμένη εκτίμηση για τη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης μπορεί να οδηγήσει, για την περίπτωση ιδιαίτερα σκληρών φάσεων, σε ρωγματώσεις του μετάλλου συγκόλλησης. Η ελεγχόμενη απόψυξη της συγκόλλησης μπορεί να ωφελήσει στη δημιουργία φάσεων μικρότερης σκληρότητας έτσι ώστε να αποφευχθούν οι ρωγματώσεις.



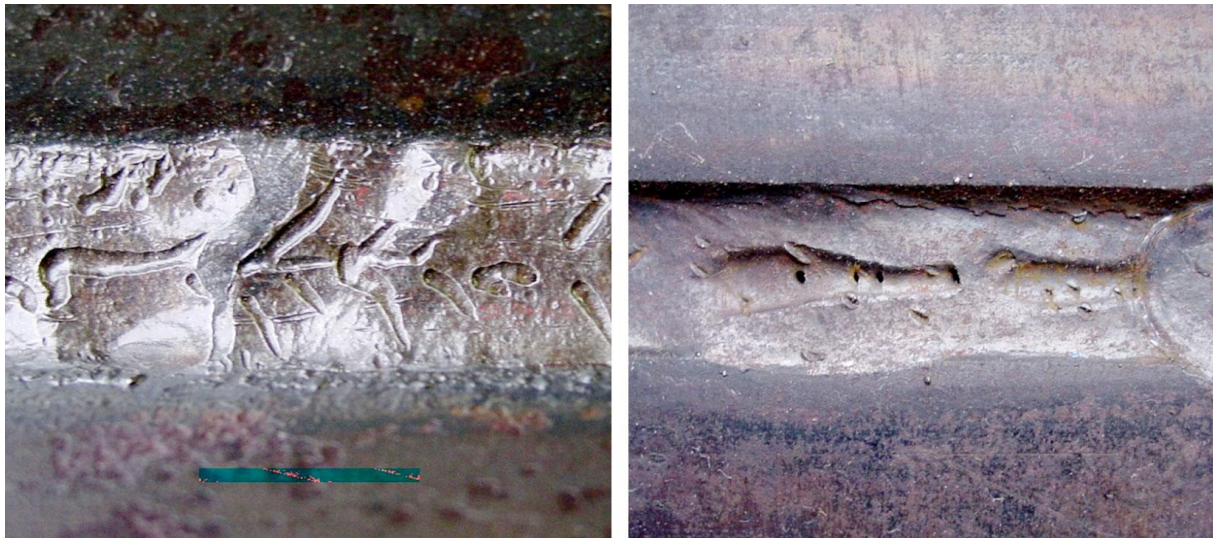
Εικόνα 1.17 Ρωγμάτωση λόγω διαχεόμενου υδρογόνου

Μια πιθανή αιτία αύξησης των επιπέδων του υδρογόνου στο περιβάλλον της συγκόλλησης είναι ατέλειες ή σφάλματα στο σύστημα παροχής προστατευτικού αερίου. Μια αύξηση του ποσοστού υδρογόνου στην περιοχή της συγκόλλησης μπορεί να αυξήσει τα ποσοστά του απορροφούμενου υδρογόνου στη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης, που μπορεί να οδηγήσει στη δημιουργία ρωγμών εν ψυχρώ. Οι διακυμάνσεις των παραμέτρων της συγκόλλησης είναι οι κύριες αιτίες προσρόφησης υδρογόνου από τη μικροδομή του μετάλλου συγκόλλησης. Η αυξομείωση του ποσοστού υδρογόνου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τις εναλλαγές στην ένταση του ρεύματος. Επίσης η αύξηση της τάσης του τόξου μπορεί να οδηγήσει σε προσρόφηση αυξημένων ποσοστών υδρογόνου από τη συγκόλληση. Χαρακτηριστική μείωση στα ποσοστά υδρογόνου μπορεί να επιφέρει η αύξηση του μήκους του τόξου. Πέρα όμως από τις συνθήκες συγκόλλησης, η προσρόφηση του υδρογόνου μπορεί να περιέλθει από τους παρακάτω παράγοντες:

- Αυξημένη υγρασία στην ατμόσφαιρα γύρω από τη λίμνη συγκόλλησης και στο αέριο προστασίας.
- Αυξημένη υγρασία στη σκόνη του πυρήνα των ηλεκτροδίων.
- Οργανικές ουσίες στη σκόνη του πυρήνα.
- Υδρογονούχες ουσίες σε εξωτερικά υλικά όπως βαφές και έλαια.

Τα σφάλματα της μορφής «worm tracks» αποτελούν επί της ουσίας επιφανειακά σημάδια στη ραφή της συγκόλλησης. η αιτία δημιουργίας τους είναι τα διασπώμενα αέρια της συγκόλλησης τα οποία εκλύονται κατά τη στερεοποίηση του μετάλλου συγκόλλησης και παγιδεύονται ανάμεσα στο μέταλλο συγκόλλησης και την επιφανειακή σκουριά, που

εναποτίθεται στη μέθοδο FCAW. Τα σφάλματα αυτά παρουσιάζονται με τη μορφή γραμμικών ατελειών, πολλές φορές συνενωμένων, παράλληλα στην επιφάνεια συγκόλλησης.



Εικόνα 1.18 Χαρακτηριστική μορφή των ατελειών τύπου worm tracks

1.3.5 Πλεονεκτήματα – Μειονεκτήματα της μεθόδου FCAW [3], [9], [10], [17]

Το κυριότερο πλεονέκτημα της μεθόδου FCAW είναι η αυξημένη παραγωγικότητα που εμφανίζει σε πληθώρα εφαρμογών. Αυτό σημαίνει πως έχει μικρότερο συνολικό κόστος από άλλες μεθόδους που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν αντιστοίχως όπως η χειροκίνητη SMAW, η SAW, και η GMAW. Επίσης σε σχέση με τις αναφερθείσες μεθόδους, η FCAW, παρουσιάζει μεγαλύτερη ευελιξία και προσαρμοστικότητα.

Χαρακτηριστικά αναφέρονται ως πλεονεκτήματα της μεθόδου FCAW, τα παρακάτω:

- Υψηλή ποιότητα εναποτιθέμενου μετάλλου.
- Πολύ καλής ποιότητας όψη της συγκόλλησης
- Μεγάλη ποικιλία ως προς τους προς συγκόλληση χάλυβες καθώς και μεγάλο εύρος συγκολλησίσιμου πάχους.
- Μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης υλικού και υψηλή πυκνότητα ρεύματος.
- Εύκολη αυτοματοποίηση της μεθόδου
- Μεγάλος βαθμός αξιοποίησης του μετάλλου του ηλεκτροδίου
- Χαμηλές απαιτήσεις καθαρισμού των τεμαχίων σε σχέση με την GMAW
- Καλές ανοχές σε προσμίξεις που θα μπορούσαν να οδηγήσουν σε θραύση της συγκόλλησης
- Μικρή πιθανότητα ψυχρής ρωγμάτωσης (underbead cracking)
- Στην περίπτωση της S-FCAW, η μέθοδος μπορεί και ανταπεξέρχεται στην ύπαρξη σχετικά ισχυρών ρευμάτων αέρα.

Παρόλο που η μέθοδος παρουσιάζει πολλά πλεονεκτήματα σε σχέση με άλλες μεθόδους συγκόλλησης, έχει κάποιους περιορισμούς όσον αφορά στο κόστος του εξοπλισμού, την εκπομπή καυσαερίων, την ανάγκη αφαίρεσης της σκουριάς ανά πάσο ή στο τέλος της συγκόλλησης ενός πάσου.

Τα μειονεκτήματα της μεθόδου συνοψίζονται στα παρακάτω:

- Η μέθοδος περιορίζεται στη συγκόλληση σιδηρούχων κραμάτων και κραμάτων νικελίου
- Παράγει σκουριά που πρέπει να αφαιρείται ανά πάσο συγκόλλησης

- Έχει μεγάλο κόστος ηλεκτροδίου ανά μονάδα βάρους σε σχέση με τα συμπαγή ηλεκτρόδια
- Μεγάλη παραγωγή καυσαερίων σε σχέση με την μέθοδο GMAW.

Επίσης κατά τη συγκόλληση με τη μέθοδο FCAW, λόγω της αυξημένης πυκνότητας ρεύματος, η θερμοκρασία που αναπτύσσει το τόξο είναι πολύ αυξημένη και η ακτινοβολία που εκπέμπει είναι πολύ ισχυρή, με αποτέλεσμα να αναγκάζεται ο συγκολλητής να κάνει περισσότερα διαλείμματα κατά την εκτέλεση του έργου. Τέλος οι συγκολλήσεις FCAW, παρουσιάζουν συχνά την ανάγκη χαλάρωσης των παραμενουσών τάσεων που έχουν συσσωρευτεί στη ζώνη που έχει επηρεάσει η συγκόλληση.

1.3.6 Μέθοδος συγκόλλησης με σωληνοειδή ηλεκτρόδια με μεταλλική σκόνη πυρήνα (Metal Core Arc Welding – MCAW) [17], [19],

Παρόλο που η μέθοδος FCAW, εξασφαλίζει πιο ευνοϊκές συνθήκες για το συγκολλητή, μεγάλους ρυθμούς εναπόθεσης μετάλλου προσθήκης σε διάφορες θέσεις συγκόλλησης (κάθετη και ουρανού) και παρέχει πολύ καλές μηχανικές ιδιότητες στη ραφή της συγκόλλησης, υπάρχει η ανάγκη, να επιτευχθεί ο συνδυασμός υψηλού ρυθμού εναπόθεσης με την αποδοτικότητα της εναπόθεσης, δηλαδή το ποσοστό του βάρους του ηλεκτροδίου που τελικά παραμένει στο μέταλλο συγκόλλησης.

Η απάντηση σε αυτό ήρθε με τη δημιουργία σωληνοειδών ηλεκτροδίων που έχουν στο εσωτερικό τους αποκλειστικά μεταλλική σκόνη. Η μέθοδος που χρησιμοποιεί τα εν λόγω ηλεκτρόδια ονομάζεται MCAW (Metal Core Arc Welding).

Η μέθοδος MCAW χρησιμοποιεί, όπως ακριβώς η GMAW, τη θερμότητα από ένα ηλεκτρικό τόξο συνεχούς ρεύματος προκειμένου να τήξει το μέταλλο βάσης και το μέταλλο προσθήκης έτσι ώστε να επιτευχθεί μόνιμη συγκόλληση. Η χρήση προστατευτικού αερίου είναι απαραίτητη. Προφανώς από τη στιγμή που η μέθοδος MCAW είναι μια παραλλαγή της μεθόδου GMAW, θα παρουσιάζει αρκετά κοινά στοιχεία με αυτήν αλλά και κάποιες διαφορές. Όπως στην GMAW έτσι και στην MCAW χρησιμοποιείται πηγή συνεχούς ρεύματος, όμως στην MCAW τα ηλεκτρόδια είναι σχεδιασμένα να λειτουργούν τόσο σαν θετικοί όσα και σαν αρνητικοί πόλοι και κάποια από αυτά μπορούν να λειτουργήσουν και στις δύο συνθήκες.

Το συμπαγές μεταλλικό περίβλημα του ηλεκτροδίου, άγει το ηλεκτρικό ρεύμα που είναι απαραίτητο για τη δημιουργία του τόξου της συγκόλλησης. Τα συγκεκριμένα ηλεκτρόδια, λόγω της σύνθετης φύσης τους, μπορούν και μεταφέρουν μεγαλύτερη πυκνότητα ρεύματος στις ίδιες συνθήκες ρεύματος, σε σχέση με τα συμπαγή ηλεκτρόδια, γεγονός που βελτιώνει σημαντικά το ρυθμό εναπόθεσης του μετάλλου προσθήκης.

Τα συστατικά που περιέχονται στον πυρήνα του σωληνοειδούς ηλεκτροδίου μεταλλικής σκόνης, είναι κυρίως το μαγνήσιο και το πυρίτιο και σε κάποιες περιπτώσεις το νικέλιο, το χρώμιο και το μολυβδαίνιο. Επίσης σε κάποιες περιπτώσεις μπορεί να περιέχονται μικρές ποσότητες στοιχείων που λειτουργούν σαν σταθεροποιητές του ηλεκτρικού τόξου, όπως είναι το νάτριο και το κάλιο. Τα ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης, παρέχουν τη δυνατότητα δημιουργίας κραματωμένου μετάλλου συγκόλλησης και πλέον είναι δυνατή ακόμα και η δημιουργία ωστενιτικών και φερριτικών ανοξείδωτων χαλύβων, πέρα από τα συνηθισμένα κράματα νικελίου, χρωμίου και μολυβδαίνιου. Τα ηλεκτρόδια αυτά περιέχουν ελάχιστα ή καθόλου συστατικά που δημιουργούν επιφανειακή σκουριά. Όπως και στην περίπτωση χρήσης των συμπαγών ηλεκτροδίων της GMAW, έτσι και με τη χρήση αυτών των ηλεκτροδίων μπορεί να λάβει χώρα ο σχηματισμός μικρών «νησίδων» πυριτίου στην επιφάνεια της συγκόλλησης, γεγονός που επιτρέπει τη διεξαγωγή πολλαπλών πάσων συγκόλλησης (multi-pass welding), χωρίς να είναι απαραίτητη η απομάκρυνση της σκουριάς.

Γενικά η αποδοτικότητα της εναπόθεσης ορίζεται από το ποσό του καταναλισκόμενου ηλεκτροδίου που γίνεται πραγματικά μέταλλο προσθήκης και δεν χάνεται με τη μορφή σκουριάς, εκτοξεύσεων και καυσαερίων. Όσο μεγαλύτερη είναι η αποδοτικότητα της εναπόθεσης του ηλεκτροδίου τόσο λιγότερο ηλεκτρόδιο «δαπανάται» τελικά για τη διεξαγωγή της συγκόλλησης. Τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια μεταλλικής σκόνης, παρουσιάζουν υπό συνθήκες μέχρι και 98% απόδοση εναπόθεσης μετάλλου. Συνθήκες που επιτυγχάνεται αυτό είναι η μεταφορά του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή σταγονιδίων (spray transfer) και η ύπαρξη αερίου προστασίας με υψηλή περιεκτικότητα σε Αργό. Το κατώτατο όριο που παρουσιάζει η αποδοτικότητα της εναπόθεσης σε αυτά τα ηλεκτρόδια είναι 92%, ενώ το ανώτατο όριο αποδοτικότητας ενός ηλεκτροδίου της μεθόδου FCAW είναι 89%. Αυτό δείχνει ότι τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης είναι πολύ πιο αποδοτικά από αυτά της μεθόδου FCAW και προσομοιάζουν σε απόδοση τα συμπαγή ηλεκτρόδια της GMAW. Προφανώς οι συνθήκες υπό τις οποίες διεξάγεται μια συγκόλληση, επηρεάζει σημαντικά την αποδοτικότητα της εναπόθεσης και η επιλογή μεθόδου συγκόλλησης εξαρτάται σε πολύ μεγάλο βαθμό από τα τελικά χαρακτηριστικά συγκόλλησης που υπάρχει η ανάγκη να επιτευχθούν.

Ο ρυθμός εναπόθεσης ενός ηλεκτροδίου, αναφέρεται στο πόσο μέταλλο προσθήκης εναποτίθεται σε μια συγκεκριμένη χρονική περίοδο. Το μέγεθος αυτό σε συνδυασμό με την αποδοτικότητα της εναπόθεσης, είναι οι βασικοί παράγοντες που καθορίζουν την απόδοση κόστους ενός ηλεκτροδίου. Γενικά τα σωληνοειδή ηλεκτρόδια, τόσο της FCAW όσο και της MCAW, έχουν το μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης σε σχέση με όλα τα υπόλοιπα ηλεκτρόδια που χρησιμοποιούνται στις συγκολλήσεις τήξης. Παραδείγματος χάριν ένα σωληνοειδές ηλεκτρόδιο διαμέτρου 1.2 mm μπορεί να παρουσιάζει ρυθμό εναπόθεσης 5.4-6.4 kg/hr ενώ ένα συμπαγές ηλεκτρόδιο ίδιας διαμέτρου περιορίζεται στα 3.6-4.5 kg/hr. Έτσι ένα σωληνοειδές ηλεκτρόδιο για χρήση με τη μέθοδο MCAW που έχει παρόμοια αποδοτικότητα εναπόθεσης με ένα συμπαγές ηλεκτρόδιο, είναι πιο οικονομικό γιατί έχει μεγαλύτερο ρυθμό εναπόθεσης, επομένως με τη χρήση του υλοποιείται το ίδιο έργο σε λιγότερο χρόνο.

Η χρήση της μεθόδου MCAW, συνεπάγεται οριακά την ολοκληρωτική απουσία σκουριάς στην επιφάνεια της συγκόλλησης, γεγονός που ήταν μέχρι πολύ πρόσφατα αποκλειστικό πλεονέκτημα της GMAW σε σχέση με την FCAW, καθώς επίσης και σημαντική μείωση των εκτοξεύσεων σε σχέση με τη μέθοδο FCAW, αν χρησιμοποιείται μίγμα αερίου με υψηλή περιεκτικότητα σε Αργό.

Η απουσία σκουριάς και η απουσία εκτεταμένων εκτοξεύσεων δίνει μεγάλο πλεονέκτημα στην MCAW, όταν εφαρμόζεται σε συγκολλήσεις σε συνεχόμενες παραγωγικές διαδικασίες, όπου το τεμάχιο περνά από τη φάση της συγκόλλησης απευθείας στη φάση καθαρισμού και βαφής. Η ανάγκη καθαρισμού ενός συγκολλημένου τεμαχίου από τις εκτοξεύσεις μπορεί να αυξήσει σημαντικά το κόστος παραγωγής. Τα ηλεκτρόδια με πυρήνα μεταλλικής σκόνης περιέχουν συστατικά που σταθεροποιούν το τόξο και έτσι μειώνονται οι εκτοξεύσεις.

Όλα τα παραπάνω δείχνουν τα πλεονεκτήματα της χρήσης των σωληνοειδών ηλεκτροδίων με μεταλλικής σκόνης πυρήνα και της μεθόδου MCAW. Τα μειονεκτήματα της μεθόδου φαίνονται συνοπτικά παρακάτω:

- Η επίτευξη των κατάλληλων συνθηκών ταχύτητας και θέσης για τη σωστή εφαρμογή της μεθόδου και την πλήρη εκμετάλλευση των δυνατοτήτων της, απαιτεί τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων με τη χρήση ρομποτικής διάταξης.
- Είναι απαραίτητη η μεταφορά με τη μορφή σταγονιδίων και άρα απαιτείται μεγάλο ποσοστό Αργού στο αέριο μίγμα προστασίας. Το μεγάλο ποσοστό Αργού παρόλο που μειώνει δραστικά τα εκπεμπόμενα καυσαέρια, η εκπεμπόμενη θερμότητα με τη μορφή

ακτινοβολίας είναι επίσης πολύ μεγάλη. Επομένως καθίσταται αναγκαία η χρήση υδρόψυκτων πιστολιών συγκόλλησης προκειμένου να υπάρχει επαρκής προστασία από το τόξο και από το ακτινοβολούμενο φως.

- Για να επιτευχθεί η συγκόλληση σε όλες τις θέσεις θα πρέπει να υπάρχει η δυνατότητα μεταφοράς του τηγμένου μετάλλου με τη μορφή βραχυκύκλωσης. Οι δυσμενείς επιπτώσεις αυτού θα μπορούσαν να εξαλειφθούν από την αποδοτικότητα της εναπόθεσης του ηλεκτροδίου και από το μεγάλο ρυθμό εναπόθεσης που έχουν αυτά τα ηλεκτρόδια. Έτσι, επειδή οι περισσότερες μηχανές συγκόλλησης δεν έχουν προγράμματα ειδικά προσαρμοσμένα στην MCAW, θα πρέπει να γίνουν αλλαγές στο πρόγραμμα της μηχανής προκειμένου να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες συγκόλλησης.

Βιβλιογραφία Κεφαλαίου 1

- [1] J. N. Pires, A. Loureiro, G. Bolsmjo, *Welding Robots, Technology, System Issues and Applications*, Springer, Berlin, Germany 2006
- [2] S.B. Chen, Y. Zhang T. Qiu T. Lin, *Robotic Welding with Vision – Sensing and Self – learning Neuron Control of Arc Welding Dynamic Process*, Journal of Intelligent and Robotic Systems, vol. 36, Netherlands 2003
- [3] American Welding Society, *Welding Handbook*, 9th ed., Volume 2, *Welding Processes, Part I*, U.S.A. 2004
- [4] Miller Electric, *Guidelines for Shielded Metal Arc Welding*, Miller Electric Mfg. Co. Illinois, U.S.A. 2013
- [5] BOC, *Submerged Arc Welding (SAW), Section 4*, BOC 2007
- [6] Β. Ι. Παπάζογλου Δ. Ι. Παντελής, *Επιστήμη και τεχνική των συγκολλήσεων* (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις), Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 2014
- [7] Miller Electric, *Guidelines for Gas Tungsten Arc Welding (GTAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois, U.S.A. 2013
- [8] Β. Ι. Παπάζογλου, *Ναυπηγική Τεχνολογία*, (Πανεπιστημιακές Σημειώσεις), Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995
- [9] K. Weman G. Linden, *MIG Welding Guide*, Woodhead Publishing, Cambridge, U.K. 2006
- [10] K. Weman, *Welding processes handbook*, 2nd ed., Woodhead Publishing, Cambridge U.K. 2012
- [11] Lincoln Electric, *Gas Metal Arc Welding, Products and Procedure Selection*, Lincoln Electric, Cleveland, U.S.A. 2006
- [12] Kobe Steel Ltd., *Essential Factors in Gas Shielded Metal Arc Welding*, Kobe Steel Ltd, Tokyo, Japan 2015
- [13] R. Blondeau, *Metallurgy and Mechanics of Welding*, ISTE Ltd. London, U.K. WILEY Inc., Hoboken, U.S.A. 2008
- [14] Miller Electric, *Guidelines for Gas Metal Arc Welding (GMAW)*, Miller Electric Mfg. Co., Illinois, U.S.A. 2012
- [15] Γ. Ν. Χαϊδεμενόπουλος, *Εισαγωγή στις Συγκολλήσεις*, Εκδόσεις Τζιόλα, Θεσσαλονίκη 2010
- [16] J. Norrish, *Advanced welding processes, Technologies and processes control*, Woodhead Publishing, Cambridge, U.K. 2006
- [17] BOC, *GMAW (MIG)/FCAW/MCAW*, BOC 2007
- [18] American Welding Society, *CAW Best Practices*, Welding Journal, November 2006, Miami, U.S.A. 2006
- [19] D. Myers, *Advantages and Disadvantages of Metal Cored Wires*, ESAB KNOWLEDGE CENTER, ESAB, Stockholm, Sweden, 2016, www.esabna.com

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2^ο

Παραμένουσες Τάσεις λόγω Συγκόλλησης

2.1 Εισαγωγή στις Παραμένουσες Τάσεις [1], [2]

Οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να χαρακτηριστούν ως εκείνες οι τάσεις που ενυπάρχουν σε ένα στερεό σώμα παρόλο που αυτό βρίσκεται σε ακινησία και σε κατάσταση ισορροπίας με το περιβάλλον του. Οι τάσεις αυτές είναι αυτό-ισοσταθμιζόμενες, πράγμα που σημαίνει πως το σύνολο των θλιπτικών και των εφελκυστικών τάσεων που μπορεί να ενυπάρχουν στο εσωτερικό του υλικού ή της κατασκευής, προκαλούν μηδενική δύναμη και ροπή στο σύνολο του όγκου τους.

Σχεδόν όλες οι διαδικασίες κατασκευής μπορούν να εισάγουν παραμένουσες τάσεις στα υλικά ή τα εξαρτήματα που βρίσκονται υπό κατασκευή. Πέρα όμως από αυτό οι παραμένουσες τάσεις μπορούν να δημιουργηθούν κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος ή της κατασκευής. Όταν υπάρχει ανομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση σε μια περιοχή του υλικού, οι συνοριακές περιοχές των κόκκων του υλικού τείνουν να αντιδρούν ελαστικά στην παραμόρφωση με αποτέλεσμα να υπάρχει δημιουργία παραμενουσών τάσεων στο εσωτερικό του υλικού.

Οι μηχανισμοί που λαμβάνουν χώρα στη δημιουργία των παραμενουσών τάσεων περιλαμβάνουν τα παρακάτω:

- Μη ομοιόμορφη πλαστική παραμόρφωση. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι κατεργασίες κατά τις οποίες αλλάζει η γεωμετρία του υπό κατεργασία υλικού (όπως είναι η σφυρηλάτηση, η έλαση, η κάμψη, η ολκή και η διέλαση). Επίσης ο μηχανισμός αυτός μπορεί να εμφανίζεται και κατά τη διάρκεια λειτουργίας του τελικού εξαρτήματος όπως είναι σε έδρανα κύλισης και σε ράγες σιδηροδρόμου.
- Αλλαγή της επιφάνειας. Αφορά σε μηχανουργικές κατεργασίες φρεζαρίσματος, τριβίσματος, γωνιακής κάμψης, ενώ κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος αφορά στη διάβρωση και την οξείδωση.
- Αλλαγή φάσης του υλικού και αλλαγή της πυκνότητάς του, υπό την παρουσία μεγάλων θερμικών φορτίων. Αυτός ο μηχανισμός αφορά σε κατεργασίες συγκολλήσεων, χύτευσης, βαφής, αναθέρμανσης, με σκοπό την αλλαγή φάσης σε μέταλλα και κεραμικά. Κατά τη διάρκεια λειτουργίας του εξαρτήματος μπορεί να οφείλεται σε προσβολή από ραδιενέργεια ή σε λειτουργία υπό μεγάλα θερμικά φορτία.

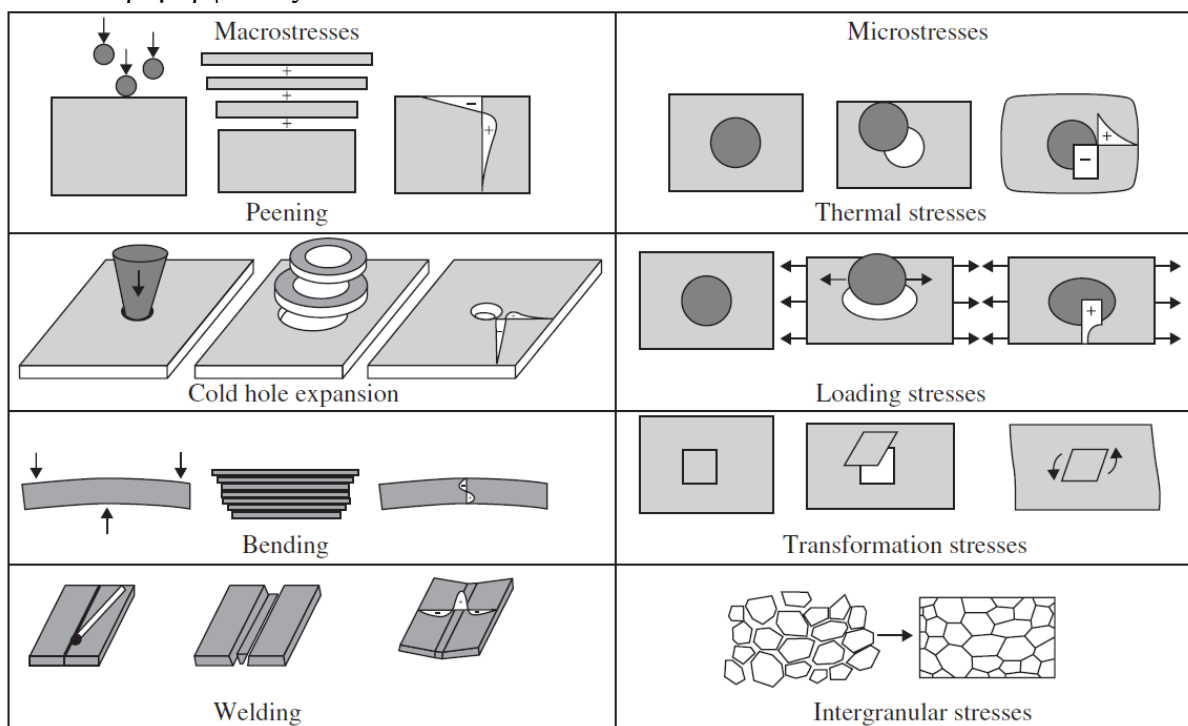
Η ύπαρξη παραμενουσών τάσεων μπορεί να έχει τόσο θετικές όσο και αρνητικές επιδράσεις στο εξάρτημα ή στο υλικό που εμφανίζονται. Η ύπαρξή τους μπορεί να οδηγήσει σε αστοχία του εξαρτήματος λόγω της μείωσης της αντοχής του σε εξωτερικά επιβαλλόμενα φορτία αλλά η κατανόηση και η σωστή εκτίμησή τους μπορούν να οδηγήσουν σε σχεδιασμό εξαρτημάτων με βελτιωμένες μηχανικές ιδιότητες και μεγαλύτερη αντοχή.

Η ύπαρξη και η μελέτη των παραμενουσών τάσεων έχει μεγάλο ενδιαφέρον για τον κατασκευαστικό σχεδιασμό αφού επηρεάζουν με άμεσο τρόπο τη μηχανική συμπεριφορά και την αντοχή των κατασκευών. Μια ενδεχόμενη αστοχία ενός εξαρτήματος ή τμήματος μιας κατασκευής μπορεί να είναι συνέπεια της συνδυασμένης δράσης των παραμενουσών τάσεων με τις τάσεις που προκαλούνται λόγω εξωτερικών φορτίων.

Η κατάταξη των παραμενουσών τάσεων μπορεί να γίνει με διάφορα κριτήρια με τρεις κύριους τρόπους κατάταξης.

Ο πρώτος τρόπος κατάταξης έχει να κάνει με τις αιτίες που δημιουργούν τις παραμένουσες τάσεις. Μέσω αυτού του τρόπου κατάταξης αναδεικνύονται οι παρακάτω κατηγορίες:

- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται λόγω πλαστικής παραμόρφωσης σε σώμα που θεωρείται ελαστοπλαστικό.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται κατά την ανομοιόμορφη θέρμανση και ψύξη του σώματος.
- Μόνιμες παραμένουσες τάσεις που δημιουργούνται κατά το μετασχηματισμό φάσεων και δομικών στοιχείων.
- Θερμικές (χρονικές) παραμένουσες τάσεις που προκαλούν μόνο ελαστικές παραμορφώσεις



Εικόνα 2.1 Τυπικά παραδείγματα δημιουργίας παραμενουσών τάσεων

Ο δεύτερος τρόπος κατάταξης έχει σαν κριτήριο την χαρακτηριστική κλίμακα στην οποία εξισορροπούνται οι παραμένουσες τάσεις. Με βάση αυτόν τον τρόπο κατάταξης διακρίνονται οι ακόλουθες κατηγορίες παραμενουσών τάσεων:

- Τύπου I. Είναι οι τάσεις που εξισορροπούνται σε μακροσκοπική κλίμακα (χαρακτηριστικό μήκος ίσο με την κλίμακα της κατασκευής) και εκτείνονται σε διαστάσεις που εκκινούν από mm.
- Τύπου II. Είναι οι παραμένουσες τάσεις που εξισορροπούνται σε διαστάσεις μεγέθους μm , παραδείγματος χάριν στα όρια των κόκκων του υλικού (χαρακτηριστικό μήκος ίσο με τρεις έως δώδεκα φορές το μέγεθος των κόκκων του υλικού).
- Τύπου III. Είναι οι παραμένουσες τάσεις που εξισορροπούνται στο εσωτερικό του κρυσταλλικού πλέγματος του υλικού εκτείνονται επομένως σε ατομικές διαστάσεις.

Ο τρίτος τρόπος κατάταξης των παραμενουσών τάσεων έχει σαν κριτήριο τη διάταξη των τάσεων αυτών στο χώρο. Αυτός ο τρόπος κατάταξης έχει σαν απόρροια τις ακόλουθες τρεις κατηγορίες (που είναι ανάλογες με την κατάταξη των τάσεων στη Μηχανική):

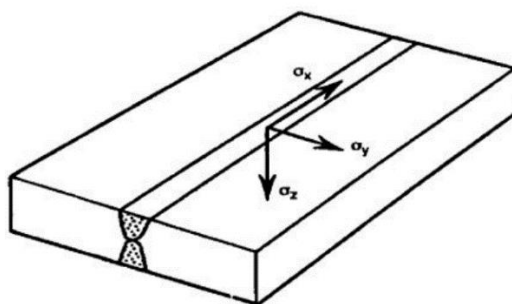
- Μονοαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται κατά μία διεύθυνση.
- Διαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται σε δύο διευθύνσεις και κατά την τρίτη θεωρούνται αμελητέες.
- Τριαξονικές παραμένουσες τάσεις, όταν αυτές αναπτύσσονται και στις τρεις διευθύνσεις.

2.2 Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις. [1], [2], [3], [4]

Κατά τη διαδικασία της συγκόλλησης, λαμβάνει χώρα τοπική θέρμανση και κατόπιν απόψυξη του μετάλλου. Καθώς η περιοχή της συγκόλλησης ψύχεται η συστολή που λαμβάνει χώρα στην περιοχή της συγκόλλησης, παρεμποδίζεται από τη σχετική ακαμψία του μετάλλου βάσης. Αυτή η διαδικασία παρεμπόδισης της μεταβολής των διαστάσεων της θερμαινόμενης περιοχής της συγκόλλησης μπορεί να χαρακτηριστεί σαν ελαστική παραμόρφωση που οδηγεί τελικά στην εμφάνιση παραμενουσών τάσεων στην περιοχή κοντά στη ραφή της συγκόλλησης.

Οι κύριοι παράγοντες που καθορίζουν το είδος και την έκταση των παραμενουσών τάσεων που εμφανίζονται σε συγκολλητές κατασκευές είναι οι παρακάτω:

- Οι παραμένουσες τάσεις που υπάρχουν στα προς συγκόλληση τεμάχια πριν την συγκόλληση, και προκύπτουν από τη διαδικασία κατασκευής και επεξεργασίας πριν τη συγκόλληση.
- Οι ιδιότητες των υλικών του μετάλλου βάσης και προσθήκης συμπεριλαμβανομένων της χημικής τους σύστασης, της μικροδομής τους, των θερμικών και των μηχανικών τους ιδιοτήτων.
- Η γεωμετρία των προς συγκόλληση τεμαχίων
- Οι περιορισμοί που έχουν εφαρμοστεί στα προς συγκόλληση τεμάχια με τη μορφή πάκτωσης ή συγκόλλησης με άλλα τμήματα μιας ευρύτερης κατασκευής.
- Η διαδικασία της συγκόλλησης συμπεριλαμβανομένων τη διεύθυνση της συγκόλλησης, των συνθηκών της συγκόλλησης και το αν πρόκειται για συγκόλληση πολλαπλών πάσων ή όχι.



Εικόνα 2.2 Σύμβαση των τάσεων στη συγκόλληση

Στο εσωτερικό της ζώνης τήξης, στη ΘΕΖ και στη γειτονική περιοχή του μετάλλου βάσης, η ροή της θερμότητας από τη συγκόλληση είναι επαρκής ώστε προκαλέσει τοπική διαρροή, οι παραμένουσες τάσεις που επιδρούν στο μεγαλύτερο ποσοστό και εξισορροπούνται είναι αυτές που εισάγονται λόγω των μηχανισμών που απορρέουν από την εφαρμογή της θερμότητας. Σε μεγαλύτερες αποστάσεις από την περιοχή της συγκόλλησης οι παραμένουσες τάσεις που εξισορροπούνται, είναι υπέρθεση των παραμενουσών τάσεων που εισάγονται λόγω της διαδικασίας της συγκόλλησης καθώς και των υπαρχουσών παραμενουσών τάσεων που προϋπήρχαν στο τεμάχιο λόγω κατασκευής. Η υπέρθεση των παραμενουσών τάσεων μπορεί

να κινείται στο γραμμικό ή στο γραμμικό ελαστοπλαστικό πεδίο ή στο πεδίο του ερπυσμού και εξαρτάται από το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων και από τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης.

Η πιο απλή υπόθεση που γίνεται για να εκτιμηθεί το μέγεθος των παραμενουσών τάσεων σε μια συγκόλληση, είναι ότι η τιμή των εφελκυστικών παραμενουσών τάσεων δεν ξεπερνά το όριο διαρροής του μετάλλου βάσης και θεωρούνται σχεδόν ίσες με αυτό. Η θεώρηση αυτή μπορεί να είναι ακριβής όταν ισχύουν οι παρακάτω δύο προϋποθέσεις:

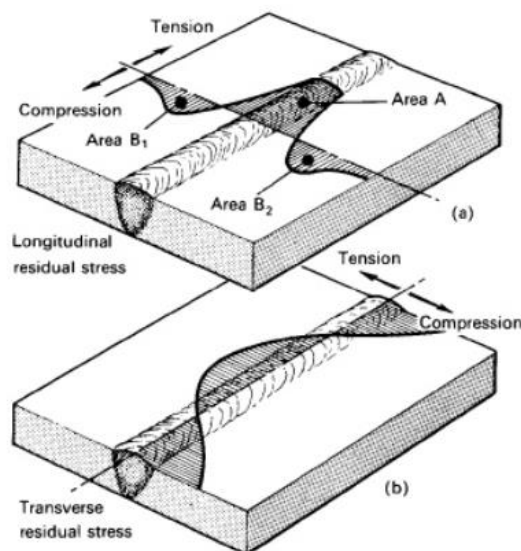
α) Εάν υπάρχει κάποιος περιορισμός της ελεύθερης συστολής του του θερμαινόμενου υλικού

β) Αν η παραμόρφωση λόγω της θερμικής συστολής από την υψηλή θερμοκρασία σε αυτή του περιβάλλοντος είναι μεγαλύτερη από την παραμόρφωση που αντιστοιχεί στο όριο διαρροής του υλικού.

Η δεύτερη προϋπόθεση λαμβάνει χώρα όταν ισχύει η ακόλουθη σχέση:

$$\alpha \cdot (T_s - T_0) \geq \frac{\sigma_y}{E}$$

Όπου α είναι ο συντελεστής θερμικής διαστολής του υλικού, T_s είναι η υψηλή θερμοκρασία, όπου στη συγκεκριμένη σχέση είναι η θερμοκρασία στην οποία το όριο διαρροής του υλικού πέφτει στο 10% της τιμής του σε θερμοκρασία περιβάλλοντος, T_0 η θερμοκρασία περιβάλλοντος, E το μέτρο ελαστικότητας του υλικού και σ_y το όριο διαρροής του υλικού στη θερμοκρασία περιβάλλοντος. Η σχέση αυτή επαληθεύεται κυρίως στην περίπτωση των ωστενιτικών χαλύβων.



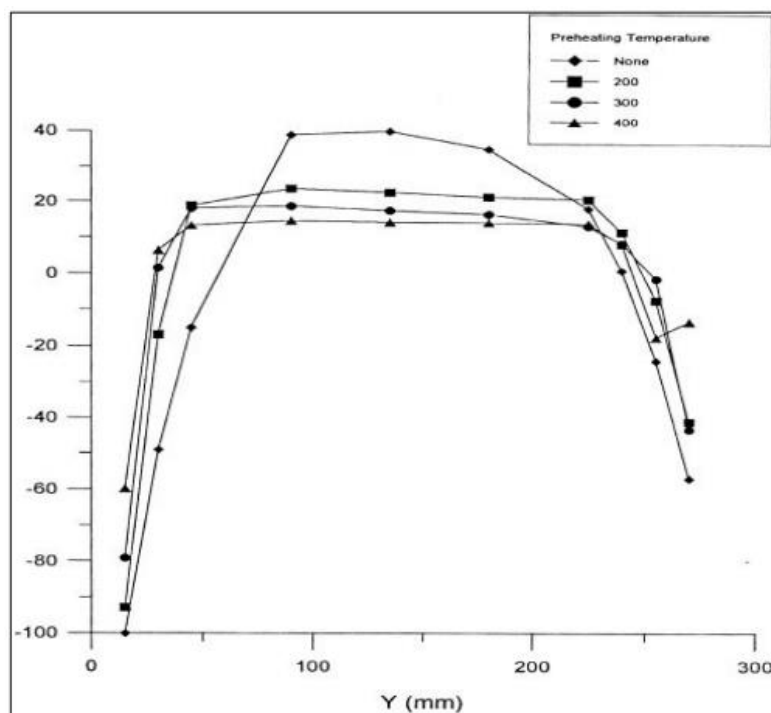
Εικόνα 2.3 Θεωρητική κατανομή παραμενουσών τάσεων στη συγκόλληση

Μια άλλη ιδιότητα των υλικών που μπορεί να επηρεάσει την εμφάνιση παραμενουσών τάσεων, είναι η ιδιότητα του μετασχηματισμού των φάσεων. Ο μετασχηματισμός των φάσεων ενός υλικού εισάγει πρόσθετες παραμορφώσεις, συμβάλλοντας στο μετασχηματισμό του όγκου που λαμβάνει χώρα κατά την ψύξη.

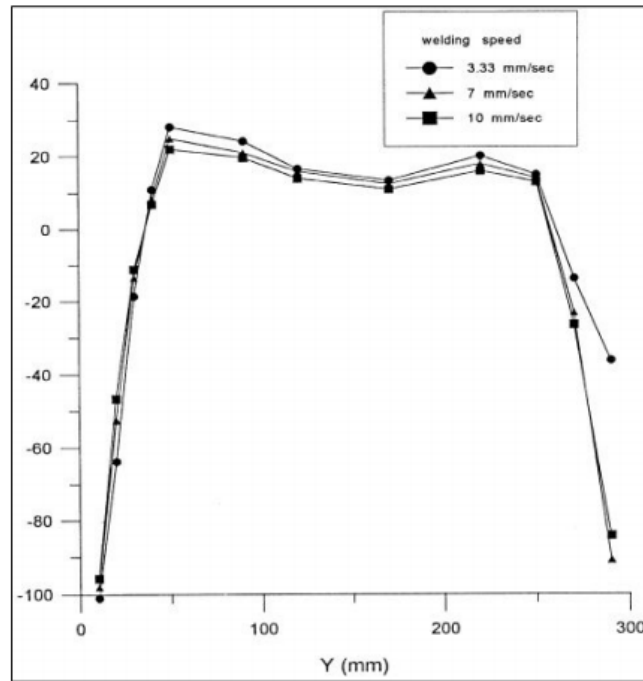
Η ίδια η μέθοδος συγκόλλησης, κυρίως η προετοιμασία που απαιτεί η κάθε μέθοδος, οι συνθήκες της συγκόλλησης και ο χρόνος μεταξύ της εναπόθεσης των πάσων σε συγκολλήσεις πολλαπλών πάσων (multipass welding), επηρεάζουν σε πολύ μεγάλο βαθμό την ανάπτυξη παραμενουσών τάσεων σε μια συγκολλητή κατασκευή. Επίσης η διαδικασία της προθέρμανσης των προς συγκόλληση τεμαχίων είναι καθοριστική στον περιορισμό των παραμενουσών τάσεων, όπως έδειξαν πειραματικές μελέτες.

Μια ακόμα σημαντική παράμετρος της συγκόλλησης που επηρεάζει τη δημιουργία παραμενουσών τάσεων σε συγκολλητές κατασκευές είναι η ταχύτητα του πυρσού της συγκόλλησης. Η υψηλή ταχύτητα κίνησης του πυρσού της συγκόλλησης, μειώνει την έκταση του μετάλλου βάσης που προσβάλλεται θερμικά με αποτέλεσμα να λαμβάνονται μειωμένες τιμές παραμενουσών τάσεων, όπως φαίνεται στην παρακάτω εικόνα, βάσει πειραματικών αποτελεσμάτων.

Οι περιορισμοί που επιβάλλονται στα προς συγκόλληση τεμάχια (μέγγενη, διατάξεις προσανατολισμού, προσωρινά πονταρίσματα) επιφέρουν αντίσταση, η οποία εμποδίζει την ελεύθερη διαστολή τους κατά την αύξηση τη θερμοκρασίας λόγω της θερμότητας που τους προσδίδεται. Η εισαγωγή τέτοιων περιορισμών μπορεί να μεταβάλλεται κατά τη διάρκεια της συγκόλλησης – ιδίως όταν πρόκειται για μεγάλες κατασκευές – επομένως η τελική επίδραση που θα έχουν στις τάσεις που παραμένουν στην κατασκευή μπορεί να είναι πολύ δύσκολο να εκτιμηθούν. Οι περιορισμοί αυτοί συνεισφέρουν στη δημιουργία παραμενουσών τάσεων μέσω των τάσεων συγκόλλησης που δημιουργούνται από τα φορτία αντίδρασης που προκαλεί η στερέωση του τεμαχίου.



Εικόνα 2.4 Η επίδραση της προθέρμανσης στο μέγεθος των παραμενουσών τάσεων



Εικόνα 2.5 Επίδραση της ταχύτητας συγκόλλησης στο μέγεθος των παραμενουσών τάσεων

2.3 Μέθοδοι μέτρησης παραμενουσών τάσεων. [2], [3], [5],

Η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων είναι μια διαδικασία πολύ μεγάλης σημασίας σε συγκολλητές κατασκευές, διότι η υπέρθεσή τους με τις τάσεις λειτουργίας της κατασκευής μπορούν να υποβαθμίσουν σημαντικά τα προβλεπόμενα όρια αντοχής της. Για το λόγο αυτό ήταν πάντα αναγκαία η ανάπτυξη μεθόδων αξιόπιστης μέτρησης των παραμενουσών τάσεων.

2.3.1 Κατηγοριοποίηση των μεθόδων μέτρησης παραμενουσών τάσεων.

Οι βασικές κατηγορίες στις οποίες κατατάσσονται οι μέθοδοι μέτρησης των παραμενουσών τάσεων είναι οι ακόλουθες:

- A) Τεχνικές Χαλάρωσης Τάσεων (stress-relaxation techniques).
- B) Τεχνικές μέτρησης με διάθλαση ακτίνων (ray diffraction techniques).
- Γ) Τεχνικές βασιζόμενες σε ιδιότητες εξαρτώμενες από την τιμή των τάσεων (techniques by use of stress-sensitive properties)
- Δ) Τεχνικές ρωγμάτωσης (cracking techniques)

Παρακάτω αναφέρονται επιγραμματικά διάφορες τεχνικές μέτρησης παραμενουσών τάσεων που εντάσσονται στις παραπάνω κατηγορίες

Μέτρηση μέσω διάνοιξης οπής. Στην παρούσα διπλωματική εργασία θα γίνει εκτενής παρουσίαση της μεθόδου αυτής σε επόμενο εδάφιο αφού είναι η μέθοδος που χρησιμοποιήθηκε για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων στα πλαίσια της πειραματικής διαδικασίας της εργασίας.

Μέτρηση μέσω καμπυλότητας. Η εναπόθεση ενός επιφανειακού στρώματος σε ένα υλικό μπορεί να εισάγει τάσεις. Οι αλλαγές που προκύπτουν στην καμπυλότητα ενός δοκιμίου μετά την εναπόθεση του επιφανειακού στρώματος μπορούν να δώσουν συμπεράσματα για τις τάσεις που έχουν συσσωρευτεί και να μετρηθούν με τη χρήση μηχανικών ή οπτικών μέσων.

Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ακτίνων X. Οι ακτίνες X με μικρά μήκη κύματος μπορούν να εντοπίσουν τις παραμορφώσεις που λαμβάνουν χώρα σε ενδοκρυσταλλικό επίπεδο αφού τα μήκη κύματος τους είναι αντίστοιχης τάξης μεγέθους με τις ενδοατομικές αποστάσεις της κρυσταλλικής δομής του υλικού.

Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης νετρονίων. Η τεχνική αυτή έχει παρόμοια χρήση με την τεχνική χρήσης ακτίνων X αλλά παρέχει το πλεονέκτημα της βαθιάς διείσδυσης στο υλικό, της τάξης του εκατοστού.

Μέτρηση μέσω διάθλασης δέσμης ηλεκτρονίων. Παρέχει τη δυνατότητα εξέτασης πολύ λεπτών δοκιμίων και αποδίδει υψηλή εγκάρσια χωρική ανάλυση.

Μέτρηση μέσω ενδοτικότητας ρωγμών. Η μέθοδος αυτή περιλαμβάνει τη διάνοιξη μικρής εγκοπής προκειμένου να ελευθερωθούν οι εσωτερικές τάσεις και να γίνει καταγραφή των παραμορφώσεων. Αλλάζοντας το βάθος της εγκοπής μπορεί να γίνει εκτενής ανάλυση του τασικού πεδίου σαν συνάρτηση του βάθους από την επιφάνεια του τεμαχίου.

Υπάρχουν επίσης τεχνικές που βασίζονται στις φυσικές ιδιότητες των υλικών όπως είναι οι θερμοελαστικές μέθοδοι που βασίζονται στο ότι οι παραμορφώσεις στο εσωτερικό του υλικού παράγουν τοπικές αλλαγές στη θερμοκρασία. Μια άλλη κατηγορία είναι οι μαγνητικές τεχνικές ανάγνωσης των παραμενουσών τάσεων, που βασίζονται στις μαγνητικές ιδιότητες που έχουν πολλά μεταλλικά υλικά.

2.3.2 Μέτρηση παραμενουσών τάσεων μέσω διάνοιξης οπής. [6]

Η διάνοιξη οπής σε ένα υλικό που περιέχει παραμένουσες τάσεις, προκαλεί την τοπική χαλάρωσή τους μέσω παραμορφώσεων. Αυτό συμβαίνει διότι η επιφάνεια της οπής είναι κάθετη στην ελεύθερη επιφάνεια του δοκιμίου, με αποτέλεσμα η ίδια η οπή να είναι ένας διευθύνων άξονας στον οποίο οι κάθετες τάσεις είναι μηδενικές. Η ανακούφιση των τάσεων στην επιφάνεια της οπής προκαλεί διαφοροποίηση των τάσεων στη γύρω της οπής περιοχή με αποτέλεσμα να υπάρχει αλλαγή στις τοπικές παραμορφώσεις της επιφάνειας του υλικού. Στη βάση των παραπάνω αναπτύχθηκε η μέθοδος μέτρησης παραμενουσών τάσεων μέσω διάνοιξης οπής.

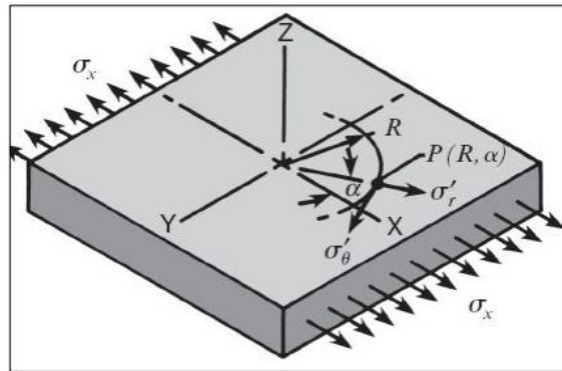
Η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων με τις μεθόδους διάνοιξης οπής είναι ίσως ο πιο διαδεδομένος τρόπος μέτρησης παραμενουσών τάσεων. Η βασική διαδικασία της μεθόδου μπορεί να συμπυκνωθεί στα παρακάτω στάδια:

- i. Προσκόλληση ειδικής ροζέτας με επιμηκυνσιόμετρα ηλεκτρικής αντίστασης (strain gages) στο σημείο που θέλουμε να μετρήσουμε παραμένουσες τάσεις στην επιφάνεια του δοκιμίου.
- ii. Τα επιμηκυνσιόμετρα συνδέονται σε έναν στατικό μετρητή παραμορφώσεων.
- iii. Τοποθετείται στο τεμάχιο, σε απόλυτη ευθυγράμμιση με το κέντρο της ροζέτας, μια διάταξη διάνοιξης οπής μεγάλης ακριβείας.
- iv. Μετά τη ζυγοστάθμιση των κυκλωμάτων, μια μικρή οπή ανοίγεται στο γεωμετρικό κέντρο της ροζέτας

- v. Λαμβάνονται ενδείξεις της χαλάρωσης των τάσεων στην περιοχή γύρω από τη ροζέτα
- vi. Χρησιμοποιούνται ειδικές μαθηματικές εξισώσεις αναγωγής των δεδομένων, υπολογίζονται οι παραμένουσες τάσεις και η κατεύθυνσή τους από τις μετρούμενες καταπονήσεις.

2.3.2.1 Η προσέγγιση της μεθόδου μέσω της θεωρίας της διαμπερούς οπής.

Η γεωμετρία της τυφλής οπής είναι αρκετά πολύπλοκη για απευθείας υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων μέσω της θεωρίας της ελαστικότητας. Έτσι αρχικά θα αναλυθεί η μέθοδος για διάνοιξη διαμπερούς οπής και έπειτα θα επεκταθεί στην τυφλή οπή.



Εικόνα 2.6 Οι τάσεις στο σημείο P πριν τη διάνοιξη της οπής

Αρχικά, πριν την διάνοιξη της οπής η κατάσταση των τάσεων στο σημείο P δίνεται με τη βοήθεια πολικών συντεταγμένων ως εξής.

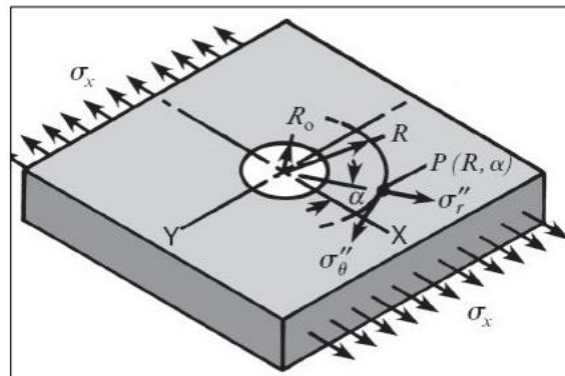
$$\sigma'_r = \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 + \cos 2\alpha) \quad (1.a)$$

$$\sigma'_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \cdot (1 - \cos 2\alpha) \quad (1.\beta)$$

$$\tau'_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \sin 2\alpha \quad (1.a)$$

Με $r = R/R_0$, όπου R_0 είναι η διάμετρος της οπής και R η αυθαίρετη ακτίνα από το κέντρο της οπής έως το σημείο P.

Στην παρακάτω εικόνα φαίνεται η κατανομή των τάσεων μετά τη διάνοιξη της οπής.



Εικόνα 2.7 Οι τάσεις στο σημείο P μετά τη διάνοιξη της οπής

Αφού οι τάσεις σ_r και $\tau_{r\theta}$ θα πρέπει να είναι 0 όπως έχει αναφερθεί, οι τάσεις στο σημείο P έχουν αλλάξει εντελώς. Μια έκφραση των νέων τάσεων δίνεται από τις παρακάτω εξισώσεις (Kirsch, 1898):

$$\sigma''_r = \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 - \frac{1}{r^2}\right) + \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \cdot \cos 2a \quad (2. \alpha)$$

$$\sigma''_\theta = \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{1}{r^2}\right) - \frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4}\right) \cdot \cos 2a \quad (2. \beta)$$

$$\tau''_{r\theta} = -\frac{\sigma_x}{2} \cdot \left(1 + \frac{3}{r^4} + \frac{4}{r^2}\right) \cdot \sin 2a \quad (2. \gamma)$$

Η διαφοράς των τάσεων πριν και μετά την ύπαρξη της οπής μπορούν να εκφραστούν ως εξής:

$$\Delta\sigma_r = \sigma''_r - \sigma'_r \quad (3. \alpha)$$

$$\Delta\sigma_\theta = \sigma''_\theta - \sigma'_\theta \quad (3. \alpha)$$

$$\Delta\tau_{r\theta} = \tau''_{r\theta} - \tau'_{r\theta} \quad (3. \alpha)$$

Τώρα είναι δυνατό να αντικατασταθούν οι παραπάνω εκφράσεις στο νόμο του Hooke και έτσι είναι δυνατό να εκφραστούν οι παραμορφώσεις στο σημείο P λόγω της χαλάρωσης των τάσεων:

$$\varepsilon_r = -\frac{\sigma_x \cdot (1 + \nu)}{2E} \cdot \left[\frac{1}{r^2} - \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2a + \frac{4}{r^2(1 + \nu)} \cdot \cos 2a \right] \quad (4. \alpha)$$

$$\varepsilon_\theta = -\frac{\sigma_x \cdot (1 + \nu)}{2E} \cdot \left[-\frac{1}{r^2} + \frac{3}{r^4} \cdot \cos 2a - \frac{4}{r^2(1 + \nu)} \cdot \cos 2a \right] \quad (4. \beta)$$

Οι σχέσεις αυτές αποδεικνύεται ότι ισχύουν για οποιοδήποτε σημείο σε ακτίνα R από την οπή ως εξής:

$$\varepsilon_r = \sigma_x \cdot (A + B \cdot \cos 2a) \quad (5. \alpha)$$

$$\varepsilon_\theta = \sigma_x \cdot (-A + C \cdot \cos 2a) \quad (5. \beta)$$

Και προφανώς οι συντελεστές που εμφανίζονται έχουν τη μορφή

$$A = -\frac{(1 + \nu)}{2E} \cdot \frac{1}{r^2} \quad (6. \alpha)$$

$$B = -\frac{(1 + \nu)}{2E} \cdot \left(\frac{4}{r^2(1 + \nu)} - \frac{3}{r^4} \right) \quad (6. \beta)$$

$$C = -\frac{(1 + \nu)}{2E} \cdot \left(-\frac{4}{r^2(1 + \nu)} + \frac{3}{r^4} \right) \quad (6. \gamma)$$

Η μέχρι τώρα ανάλυση που έχει γίνει αφορά την ιδανική κατάσταση της ύπαρξης μονοαξονικών παραμενουσών τάσεων. Στην πράξη οι παραμένουσες τάσεις όπως έχει δειχθεί σε προηγούμενο εδάφιο θεωρούνται διαξονικές (η κάθετη κατεύθυνση θεωρείται πολύ μικρή και παραλείπεται). Μπορούμε να θεωρήσουμε ότι στις μετωπικές συγκολλήσεις οι τάσεις σ_x είναι παράλληλες στη διεύθυνση της συγκόλλησης ενώ οι τάσεις σ_y είναι κάθετες στη ραφή.

Επομένως αν στις εξισώσεις (1) και (2) μπορούμε να αντικαταστήσουμε τον όρο $\cos 2\alpha$ με τον όρο $\cos(\alpha+90^\circ)$ ή βάσει των ιδιοτήτων των τριγωνομετρικών αριθμών ως $-\cos 2\alpha$. Άρα η χαλαρωμένη ακτινική τάση στο σημείο P κατά τη διεύθυνση Y γράφεται:

$$\varepsilon_r^y = \sigma_y \cdot (A - B \cdot \cos 2\alpha) \quad (7)$$

Και εξακολουθεί να ισχύει ότι:

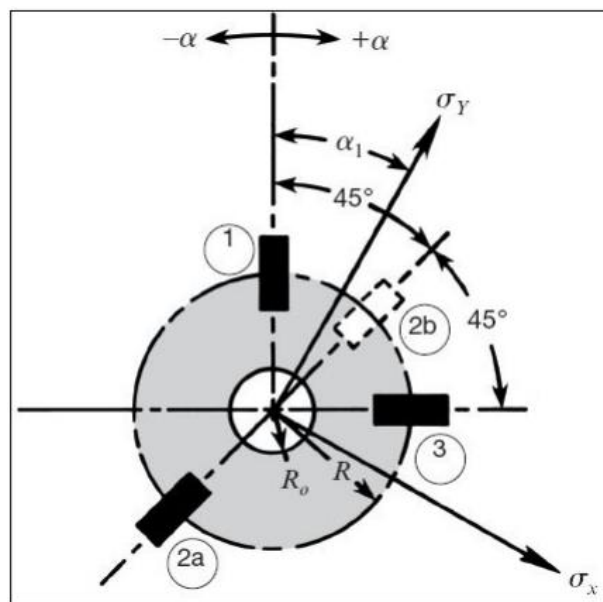
$$\varepsilon_r^x = \sigma_x \cdot (A - B \cdot \cos 2\alpha) \quad (8)$$

Όταν οι παραμένουσες τάσεις είναι παρούσες ταυτόχρονα, προκύπτει η γενική έκφραση για την ακτινική παραμόρφωση λόγω της διαξονικής παραμένουσας τάσης

$$\varepsilon_r = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\alpha \quad (9)$$

Η εξίσωση (9) είναι η βασική σχέση βάσει της οποίας γίνεται η ανάλυση των παραμενουσών τάσεων κατά τη μέθοδο της διάνοιξης οπής. Στην παραπάνω εξίσωση υπάρχουν τρεις άγνωστες ποσότητες και έτσι είναι απαραίτητα να γίνουν τρεις ανεξάρτητες μετρήσεις της ακτινικής παραμόρφωσης προκειμένου να υπάρχει μια πλήρης λύση. Οι μετρήσεις αυτές αντικαθίστανται στην εξίσωση (9) και στη συνέχεια προκύπτουν τρεις εξισώσεις που λύνονται ταυτόχρονα για τα μεγέθη και τις διευθύνσεις των κυρίων τάσεων.

Η διαδικασία των μετρήσεων απαιτεί την τοποθέτηση τριών επιμηκυνσιόμετρων με τη μορφή ροζέτας γύρω από την περιοχή της οπής, πριν αυτή διεξαχθεί. Η απεικόνιση μια τυπικής ροζέτας φαίνεται στο επόμενο σχήμα.



Εικόνα 2.8 Ροζέτα με τρία επιμηκυνσιόμετρα

Η τοποθέτηση των επιμηκυνσιόμετρων κατά γωνιακή αύξηση 45° οδηγεί στις απλούστερες εκφράσεις και για το λόγο αυτό μια τέτοιου τύπου διάταξη έχει γίνει πρότυπο κατασκευής για τις εμπορικές ροζέτες παραμενουσών τάσεων. Η γωνία α_1 είναι η οξεία γωνία από τον κοντινότερο κύριο άξονα έως το επιμηκυνσιόμετρο (1), ενώ $\alpha_2 = \alpha_1 + 45^\circ$ και $\alpha_3 = \alpha_1 + 90^\circ$, με τις θετικές γωνίες να μετρούνται στην κατεύθυνση αρίθμησης των επιμηκυνσιομέτρων. Η εξίσωση (9) μπορεί να γραφεί τρεις φορές, μία για κάθε επιμηκυνσιόμετρο της ροζέτας:

$$\varepsilon_1 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos 2\alpha \quad (10. \alpha)$$

$$\varepsilon_2 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos[2\alpha + 45^\circ] \quad (10. \beta)$$

$$\varepsilon_3 = A \cdot (\sigma_x + \sigma_y) + B \cdot (\sigma_x - \sigma_y) \cdot \cos[2\alpha + 90^\circ] \quad (10. \gamma)$$

Όταν αυτές οι εξισώσεις λυθούν για τις κύριες τάσεις και την κατεύθυνσή τους, προκύπτουν οι παρακάτω εκφράσεις:

$$\sigma_{max} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4\bar{A}} - \frac{1}{4\bar{B}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (11. \alpha)$$

$$\sigma_{min} = \frac{\varepsilon_1 + \varepsilon_2}{4\bar{A}} - \frac{1}{4\bar{B}} \sqrt{(\varepsilon_1 - \varepsilon_3)^2 + (\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2)^2} \quad (11. \beta)$$

Και αν αντιστρέψουμε την έννοια της γωνίας και την εκλάβουμε ως τη γωνία από το επιμηκυνσιόμετρο (1) ως τον κοντινότερο κύριο άξονα τότε έχουμε:

$$\tan 2\alpha = \frac{\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2}{\varepsilon_3 - \varepsilon_1} \quad (11. \beta)$$

Ο παρακάτω κανόνας μπορεί να αναδείξει ποιες κύριες τάσεις αναφέρονται στο επιμηκυνσιόμετρο (1):

Αν $\varepsilon_3 > \varepsilon_1$, τότε το α αναφέρεται στην σ_{max} .

Αν $\varepsilon_3 < \varepsilon_1$, τότε το α αναφέρεται στην σ_{min} .

Αν $\varepsilon_3 = \varepsilon_1$, τότε $\alpha = \pm 45^\circ$ και:

$\varepsilon_2 < \varepsilon_1, \sigma_{max}$ στις 45°

$\varepsilon_2 > \varepsilon_1, \sigma_{max}$ στις -45°

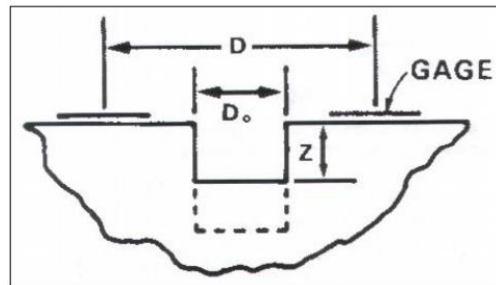
Οι μεταβλητές \bar{A} και \bar{B} , αναφέρονται με αυτόν τον τρόπο για να διαχωριστούν από τις μεταβλητές A, B των εξισώσεων (4). Οι μεταβλητές αυτές λαμβάνουν συγκεκριμένες τιμές που αναφέρονται στην πεπερασμένη επιφάνεια των επιμηκυνσιομέτρων, και όχι σε τιμές σημείου όπως στην ιδανική περίπτωση των εξισώσεων (4). Ο καθορισμός των τιμών των μεταβλητών αυτών γίνεται μέσα από πειραματική βαθμονόμηση των μετρητικών επιμηκυνσιομέτρων ή με τη μέθοδο των πεπερασμένων στοιχείων.

2.3.2.2 Η μέθοδος της τυφλής οπής

Η παραπάνω ανάλυση αναφέρεται στην ιδανική περίπτωση διάνοιξης τυφλής οπής σε επίπεδη πλάκα πολύ λεπτού πάχους σε ομοιόμορφο τασικό πεδίο. Στην πραγματικότητα όμως η ανάγκη μέτρησης παραμενουσών τάσεων εμφανίζεται σε μηχανικά μέρη με πολύ μεγαλύτερα πάχη τεμαχίων και συνήθως σε πολύπλοκες γεωμετρίες. Επομένως η συνηθέστερη πρακτική εφαρμογή της μεθόδου γίνεται μέσω της διάνοιξης μιας ρηχής τυφλής οπής.

Πέρα από την ανάγκη πειραματικής εύρεσης (ή μέσω αριθμητικής προσέγγισης με πεπερασμένα στοιχεία) των μεταβλητών \bar{A} και \bar{B} όπως αναφέρθηκε στην προηγούμενη παράγραφο, στη μέθοδο της τυφλής οπής και στον υπολογισμό των παραπάνω συντελεστών εισέρχεται και η έννοια του αδιάστατου βάθους οπής Z/D το οποίο εξηγείται σχηματικά στην Εικόνα 2.9.

Επομένως οι μεταβλητές \bar{A} και \bar{B} μπορούν να απεικονιστούν σε σχέση με τις μεταβλητές από τις οποίες εξαρτώνται σύμφωνα με τις παρακάτω σχέσεις:



Εικόνα 2.9 Τυφλή οπή σε εγκάρσια όψη. Φαίνεται το αδιάστατο βάθος οπής Z

$$\bar{A}: f_{\bar{A}} = (E, \nu, e, Z/D) \quad (12. \alpha)$$

$$\bar{B}: f_{\bar{B}} = (E, \nu, e, Z/D) \quad (12. \beta)$$

Πειραματικά αποτελέσματα έχουν δείξει ότι οι συντελεστές \bar{A} και \bar{B} εξαρτώνται από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά της ροζέτας και μόλις καθοριστούν για έναν τύπο ροζέτας, το μέγεθος της ροζέτας μπορεί να διαφοροποιηθεί και οι συντελεστές αυτοί να εξακολουθούν να ισχύουν, με την προϋπόθεση ότι η διάμετρος και το βάθος της οπής έχουν μεταβληθεί ανάλογα. Μια προσπάθεια να απαλλαγούν πλήρως αυτοί οι συντελεστές από τα γεωμετρικά χαρακτηριστικά και να αντιστοιχίζονται μόνο στο υλικό έκανε ο Schajer, και μέσω ανάλυσης με πεπερασμένα στοιχεία κατέληξε στους παρακάτω τύπους:

$$\bar{\alpha} = \frac{2 \cdot E \cdot \bar{A}}{1 + \nu} \quad (13. a)$$

$$\bar{b} = -2 \cdot E \cdot \bar{B} \quad (13. \beta)$$

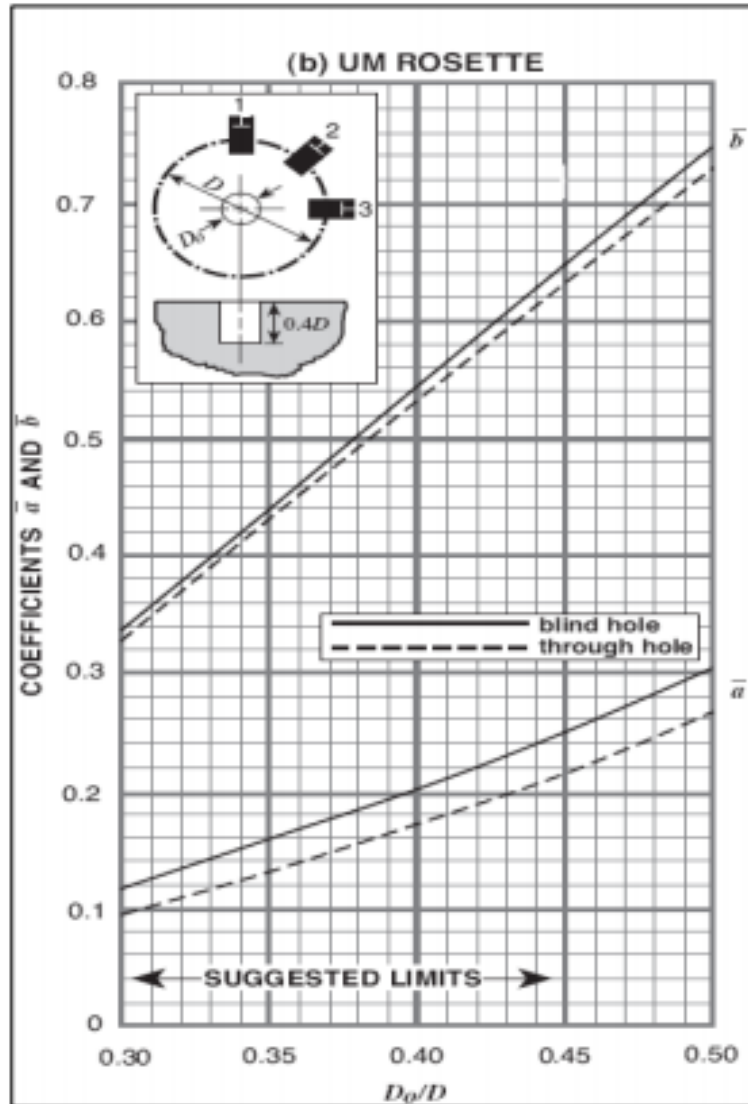
Οι παραπάνω συντελεστές προκύπτουν μέσα από πειραματική βαθμονόμηση και της ανάλυσης πεπερασμένων στοιχείων και συνήθως είναι μια διαδικασία όπου η κατασκευάστρια εταιρία την έχει κάνει για τις ροζέτες και διαθέτει τα απαραίτητα αποτελέσματα.

Η παρακάτω εικόνα δείχνει τα χαρακτηριστικά διαγράμματα – νομογραφήματα από τα οποία προκύπτουν οι παραπάνω συντελεστές.

Η διαδικασία της μέτρησης παραμενουσών τάσεων με τη μέθοδο της τυφλής οπής μπορεί να συνοψιστεί στα παρακάτω βήματα:

- Η διάνοιξη της οπής γίνεται βηματικά και για κάθε διάστημα βάθους μετράμε τις διαφορές ($\epsilon_3 - \epsilon_1$) και τα αθροίσματα ($\epsilon_3 + \epsilon_1$) των παραμορφώσεων.
- Βρίσκονται οι τιμές των παραπάνω δεδομένων για το μέγιστο βάθος οπής, δηλαδή για βάθος οπής $Z = 0.4 D$.
- Βρίσκεται το ποσοστό μέτρησης του κάθε βήματος σε σχέση με τη μέτρηση που λαμβάνεται στο τελικό βάθος.
- Σχεδιάζονται τα ποσοστά των παραμορφώσεων ($\epsilon_3 - \epsilon_1$) και ($\epsilon_3 + \epsilon_1$) για όλα τα βήματα της διάνοιξης, ως προς το λόγο Z/D που αντιστοιχεί σε κάθε βήμα διάνοιξης.

Για να υπολογιστούν οι αντίστοιχες ισοδύναμες τάσεις πρέπει να βρεθούν οι συντελεστές \bar{a} και \bar{b} οι οποίοι ανάλογα με το λόγο D_o/D διαβάζονται από τα διαγράμματα που παρατίθενται από τον κατασκευαστή της ροζέτας (Εικόνα 3.10). Στη συνέχεια αντικαθίστανται στις εξισώσεις (13) και είναι πλέον δυνατή η επίλυση των εξισώσεων (11), για τον υπολογισμό των παραμενουσών τάσεων.



Εικόνα 2.10 Νομογράφημα για την εύρεση των συντελεστών α , b , για ροζέτα τύπου "UM" της εταιρίας Micro-Measurements

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 2

- [1] Β.Ι. Παπάζογλου, Δ.Ι. Παντελής, *Επιστήμη και Τεχνική των Συγκολλήσεων*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π. 2014.
- [2] K. Masubuchi, *Analysis of Welded Structures, Residual Stress, Distortion and their Consequences*, Pergamon Press, Oxford, U.K. 1980.
- [3] G. Totten, M. Howes, T. Inoue, *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*, ASM International, Ohio, U.S.A. 2002
- [4] R.H. Leggatt, *Residual Stress in Welded Structure*, International Journal of Pressure Vessels and Piping, 2008.
- [5] G.S. Schajer, *Practical Residual Stress Measurement Methods*, Willey, West Sussex, U.K. 2013.
- [6] MICRO-MEASUREMENTS, *Measurement of Residual Stresses by the Hole-Drilling Strain Gage Method*, Tech Note 503, Micro-Measurements 2010.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3^ο

Διφασικοί Χάλυβες FCA

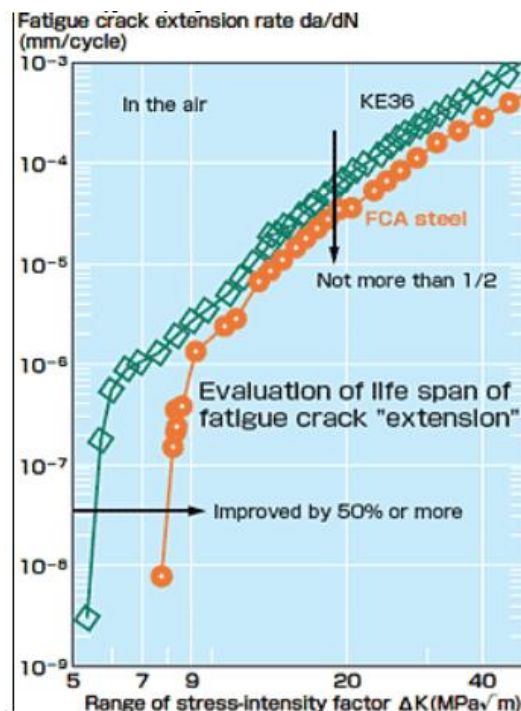
3.1 Εισαγωγή στους χάλυβες FCA.

3.1.1 Γενικά στοιχεία των χαλύβων FCA. [1], [2]

Η οικογένεια χαλύβων τύπου Fatigue Crack Arrester (FCA), είναι ένας νέος τύπος χάλυβα που αναπτύχθηκε στην Ιαπωνία το 2001. Οι χάλυβες αυτοί παρήχθησαν για πρώτη φορά από την εταιρία Sumimoto Industries Ltd. και παρουσιάζουν βελτιωμένη αντοχή σε έναρξη ρωγμής λόγω κόπωσης και εξαιρετική αντίσταση στη διάδοση ρωγμής κόπωσης σε συγκολλητές κατασκευές. Η βελτιωμένη συμπεριφορά σε ότι αφορά στην καθυστέρηση έναρξης και διάδοσης της ρωγμής λόγω κόπωσης, καθιστά αυτού του είδους τους χάλυβες αποδεκτούς από τους μεγαλύτερους νηογνώμονες παγκοσμίως όπως ο ABS, ο NK, ο DNV και άλλοι. Μέσα από πειραματικές μελέτες έχει αποδειχτεί ότι η χρήση χαλύβων FCA σε καίρια στοιχεία ενίσχυσης των πλοίων είναι πολύ αποτελεσματική, καθώς η δυνατότητά τους να δέχονται επαναλαμβανόμενα φορτία κόπωσης λόγω των κυματισμών, έχει συντελέσει στην αύξηση της διάρκειας ζωής των στοιχείων ενίσχυσης έως και 200%.

Οι χάλυβες FCA, κατασκευάζονται μέσω της ρύθμισης της χημικής τους σύστασης και εφαρμογής θερμο-μηχανικών διαδικασιών ελέγχου TMCP (Thermo-mechanical control processes). Η εφαρμογή μεθόδων TMCP συμβάλει δραστικά στη βελτίωση των μηχανικών ιδιοτήτων των χαλύβων FCA και ταυτόχρονα δεν υποβαθμίζει καθόλου τη συγκολλησιμότητά τους. Η χρήση χαλύβων που έχουν παραχθεί με μεθόδους TMCP συμβάλει δραστικά στη μείωση του βάρους της μεταλλικής κατασκευής και από τη σκοπιά των συγκολλήσεων, η χρήση τέτοιων χαλύβων οδηγεί σε μεγαλύτερες ταχύτητες συγκόλλησης, καθώς και στη δυνατότητα πρόσδοσης μεγαλύτερων ποσών θερμότητας για τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων.

Η επόμενη εικόνα δείχνει την συμπεριφορά και τις ιδιότητες του χάλυβα FCA KA36 σε σχέση με το χάλυβα KE36



Εικόνα 3.1 Συγκριτική απεικόνιση ιδιοτήτων κόπωσης για χάλυβα FCA KA36 και KE36

Οι χάλυβες FCA έχουν πολύ βελτιωμένη συμπεριφορά σε κόπωση από τους συνήθεις χάλυβες υψηλής αντοχής. Κάποια από αυτά αναφέρονται παρακάτω:

- Καλύτερος έλεγχος έναρξης ρωγμής σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες.
- Η μικροδομή του υλικού εμποδίζει τη διάδοση της ρωγμής και περιορίζει το ρυθμό διάδοσης των ρωγμών σε πολύ χαμηλά επίπεδα.
- Η χρήση TMCP μεθόδων στην παραγωγή των χάλυβων αυτών δεν υποβαθμίζει τις ιδιότητές τους (συγκολλησιμότητα, κατεργασιμότητα, αντίσταση σε διάβρωση) σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής.
- Σαν συνέπεια των παραπάνω, η χρήση αυτών των χάλυβων αυξάνει δραστικά το όριο ζωής των κατασκευών.

3.1.2 Τυποποίηση χαλύβων FCA. [2], [3]

Οι χάλυβες FCA είναι μια αναπτυσσόμενη ομάδα χαλύβων βιομηχανικής χρήσης και δεν διατίθεται επαρκής βιβλιογραφία για τα χαρακτηριστικά τους, τις ιδιότητες τους κλπ. Παρόλα αυτά, μέσω των πειραματικών αποτελεσμάτων κυρίως των κατασκευαστών μπορούν εύκολα να καταταγούν στην κατηγορία των χαλύβων υψηλής αντοχής. Επίσης τα σεβαστά ποσοστά μαγγανίου που περιλαμβάνονται στην χημική του σύσταση μπορεί να τους εντάξουν στους ανθρακο-μαγγανιούχους χάλυβες. Τα μηχανικά τους χαρακτηριστικά, τέλος τους εντάσσουν στις οικογένειες 490N, 520N, 570N, και 590N. Ο παρακάτω πίνακας παρουσιάζει μια σύντομη κατηγοριοποίηση των χαλύβων FCA σύμφωνα με τα διεθνή πρότυπα.

Πίνακας 3.1 Προτυποποίηση Χαλύβων FCA

ΤΥΠΟΠΟΙΗΣΗ ΧΑΛΥΒΩΝ FCA			
JIS		ASTM	Ship Classification Society
JIS G 3106	SM490	A572	A32, A36, A40
	SM490Y	A573	D32, D36, D40
	SM520	A572 Gr.60/65	A43/D43
	SM570	A678 Gr.C/D A841	A47/D47 E47
JIS G 3114	SMA490W	A242 Type2 A588	-
	SMA570W	-	-

3.1.3 Χημική σύσταση των χαλύβων FCA της Nippon Steel & Sumimoto Metal. [3], [4]

Στον Πίνακα 2.1 φαίνεται η τυπική χημική σύσταση των χαλύβων FCA:

Πίνακας 3.2 Χημική Σύσταση Χάλυβα FCA

Τυπική Χημική Σύσταση Χαλύβων FCA				
Στοιχείο	C	Si	Mn	P
Σύσταση % κ.β.	0.04	0.42	1.50	0.009
Στοιχείο	S	P _{cm}	C _{eq}	Άλλα Στοιχεία
Σύσταση % κ.β.	0.002	0.139	0.325	Cr,Nb,Al,Ti

Στη χημική σύσταση των χαλύβων FCA είναι δυνατό να συμπεριλαμβάνονται στοιχεία όπως το Cr, το Nb, το Al, το V, το Mo και το Ti, κάποια από τα οποία συμπεριλαμβάνονται στον υπολογισμό των P_{cm} και C_{eq} . Οι συντελεστές αυτοί χρησιμοποιούνται για τον υπολογισμό του ισοδύναμου άνθρακα, με το συντελεστή P_{cm} , να χρησιμοποιείται κυρίως στην Ιαπωνία.

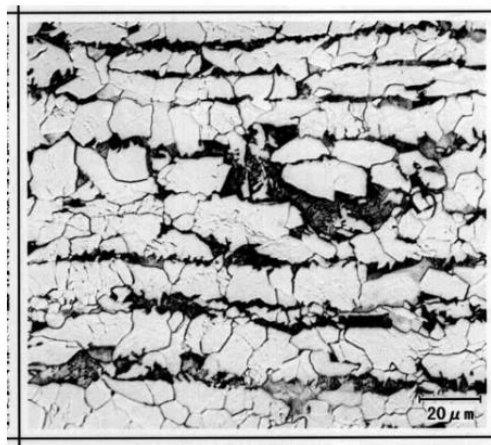
$$P_{cm}(\%) = C + \frac{Si}{30} + \frac{Mn}{20} + \frac{Cu}{20} + \frac{Ni}{60} + \frac{Cr}{20} + \frac{Mo}{15} + \frac{V}{10} + 5B$$

$$C_{eq}(\%) = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cu}{15} + \frac{Ni}{15} + \frac{Cr}{5} + \frac{Mo}{5} + \frac{V}{5}$$

Σύμφωνα με τον παραπάνω Πίνακα 3.2 η χημική σύσταση των χαλύβων FCA φαίνεται να μην είναι ιδιαίτερα εξειδικευμένη, αν εξαιρέσει κανείς τα χαμηλά ποσοστά άνθρακα που παρουσιάζονται σε αυτή. Σύμφωνα με τη διεθνή βιβλιογραφία το ποσοστό του άνθρακα κυμαίνεται μεταξύ 0.04% και 0.06% το ποσοστό του πυριτίου μεταξύ 0.42% και 0.44% και το ποσοστό του μαγγανίου από 1.48% έως 1.55%.

3.1.4 Μικροδομή των χαλύβων FCA. [1], [2]

Οι χάλυβες FCA έχουν μικροδομή που θα μπορούσε να θεωρηθεί διφασική αποτελούμενη από ομοιογενή εναλλαγή κόκκων φερρίτη και μπαινίτη. Ο μπαινίτης αποτελεί πιο σκληρή φάση σε σχέση με τον φερρίτη. Αυτού του είδους η μικροδομή αποτελεί το βασικό πλεονέκτημα των χαλύβων FCA, αφού είναι ο κυρίαρχος παράγοντας που αυξάνει την πολύ μεγάλη αντοχή που εμφανίζουν αυτοί οι χάλυβες σε κόπωση.



Εικόνα 3.2 Μικροδομή φερρίτη και περλίτη συμβατικού χάλυβα KA36



Εικόνα 3.3 Μικροδομή φερρίτη και μπαινίτη χάλυβα FCA

3.1.5 Μηχανικές ιδιότητες χαλύβων FCA. [1], [2]

Οι χάλυβες της οικογένειας FCA εμφανίζουν μηχανικές ιδιότητες αισθητά βελτιωμένες σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες. Έχουν βελτιωμένη αντοχή σε εφελκυσμό και η δυσθραυστότητα και η συγκολλησιμότητά τους είναι τουλάχιστον ισοδύναμη με αυτήν των συμβατικών χαλύβων. Ο παρακάτω πίνακας δείχνει τις μηχανικές ιδιότητες των χαλύβων αυτών.

Πίνακας 3.3 Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβων FCA, βάσει της κατηγοριοποίησης της κατασκευάστριας εταιρίας Sumimoto Metal Industries

Μηχανικές Ιδιότητες χαλύβων FCA					
Κατηγορία	Πάχος [mm]	Όριο Διαρροής [N/mm ²]	Αντοχή σε Εφελκυσμό [N/mm ²]	Επιμήκυνση %	Δυσθραυστότητα στους -40°C [J]
490N	9	425	604	18	231
	25	486	599	23	348
	50	469	576	25	395
	80	433	571	27	331
570N	38	539	651	29	323 (-20°C)
	74	498	660	28	227 (-20°C)

3.2 Συμπεριφορά χαλύβων FCA σε κόπωση.

3.2.1 Εισαγωγή στην κόπωση. [4], [5]

Η εναλλασσόμενη, περιοδική και συνεχής καταπόνηση ενός υλικού μπορεί να οδηγήσει τελικά στην αστοχία και θραύση του. Το αποτέλεσμα αυτό ονομάζεται θραύση από κόπωση. Η ναυπηγική βιομηχανία ασχολείται κυρίως με την κόπωση υψηλής συχνότητας που αφορά σε στοιχεία του σκάφους που δέχονται γρήγορα εναλλασσόμενα φορτία (έλικα, περιοχές κοντά στροφαλοφόρο κλπ.) και με την κόπωση χαμηλής συχνότητας που χαρακτηρίζει περιοχές που εμφανίζει ασυνέχεια ή γάστρα (ανοίγματα στομιών κυτών, ανοίγματα ράμπας φορτοεκφόρτωσης κλπ).

Η θραύση λόγω κόπωσης χαρακτηρίζεται από τα εξής στάδια:

1) Έναρξη της ρωγμής – fatigue crack initiation.

Αναφέρεται στο στάδιο όπου λόγω κόπωσης εμφανίζεται ένα ελάττωμα σε μια επιφανειακή περιοχή της κατασκευής. Είναι στάδιο όπου του ελάττωμα ενδεχομένως αντιμετωπίζεται.

2) Διάδοση της ρωγμής μέσω ταινιών ολίσθησης – fatigue crack propagation.

Αναφέρεται στη διαδικασία όπου η μικρή επιφανειακή ρωγμή αρχίζει να αυξάνει το μέγεθός της μέσω των κρυσταλλογραφικών επιπέδων μέγιστης διάτμησης τάσης με κάθε εναλλαγή του φορτίου (κύκλος). Η φάση αυτή ονομάζεται Στάδιο Ι ανάπτυξης της ρωγμής.

3) Διάδοση ρωγμής μέσω των επιπέδων της μέγιστης εφελκυστικής τάσης.

Είναι το στάδιο επέκτασης της ρωγμής που αναφέρθηκε στο προηγούμενο στάδιο, πλέον κάθετα στον άξονα εφαρμογής της μέγιστης εφελκυστικής τάσης (Στάδιο ΙΙ).

4) Τελικό στάδιο αστοχίας – fatigue fracture.

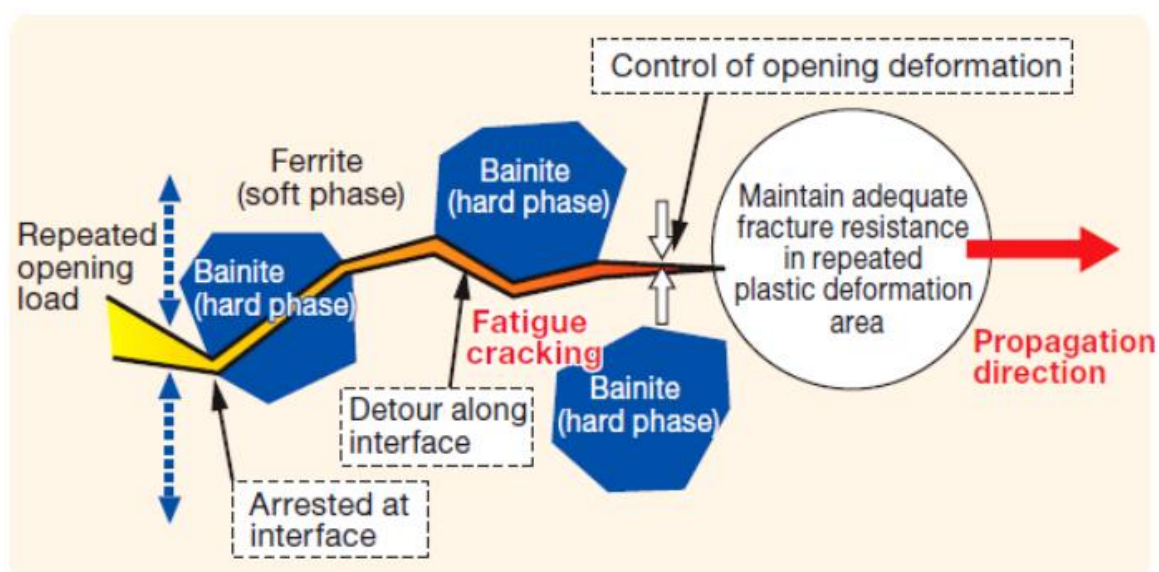
Είναι το στάδιο όπου λόγω της αυξανόμενης εναπομένουσας τάσης στην περιοχή της όλο και μεγαλύτερης ρωγμής, εμφανίζεται αύξηση του ρυθμού διάδοσης της ρωγμής. Η τελική θραύση γίνεται είτε με ψαθυρό τρόπο, όπου το μέγεθος της ρωγμής φτάνει σε κρίσιμη τιμή για τις συνθήκες που βρίσκεται η κατασκευή και για τη γεωμετρία της, είτε με όλκιμο τρόπο όπου η τοπική τάση ξεπερνά το όριο διαρροής του υλικού.

Οι ρωγμές που οφείλονται σε φορτία κόπωσης αποτελούν το σημαντικότερο παράγοντα αστοχίας κατασκευαστικών στοιχείων γάστρας πλοίου. Το πιο ουσιώδες βήμα στην αντιμετώπιση της εμφάνισης αυτού του φαινομένου είναι η κατανόηση των ιδιοτήτων έναρξης ρωγμών. Ο εντοπισμός ρωγμών στη γάστρα του πλοίου είναι μια πολύ δύσκολη και πολλές φορές ακατόρθωτη διαδικασία. Επομένως η αποφυγή εμφάνισης ρωγμών έρχεται μέσω του σχεδιασμού των κατασκευαστικών στοιχείων με τέτοιο τρόπο ώστε να υπάρχει μειωμένη συγκέντρωση κρίσιμων τάσεων σε αυτά και μέσω της επιλογής νέων υλικών κατασκευής που θα παρουσίαζαν αντίσταση στην έναρξη και τη διάδοση των ρωγμών. Τέτοιου είδους υλικά είναι και η οικογένεια χαλύβων FCA.

3.2.2 Οι χάλυβες FCA σε κόπωση. [1], [2]

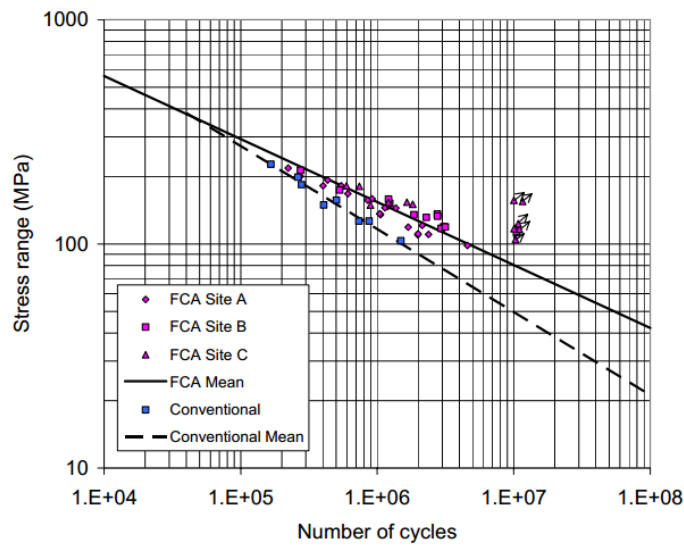
Οι χάλυβες FCA, παράγονται με μεθόδους TMCP (thermo-mechanical control processes), γεγονός που τους προσδίδει βελτιωμένη αντοχή σε κόπωση, σε σχέση με τους συμβατικούς χάλυβες. Η ιδιότητα της εξαιρετικής αντοχής σε κόπωση οφείλεται στη μικροδομή που επιτυγχάνεται μέσω των TMCP μεθόδων παραγωγής τους, δηλαδή μέσω θερμής έλασης στη μη ανακρυσταλλοποιημένη θερμοκρασιακή περιοχή και επακόλουθης επιταχυνόμενης ψύξης.

Αυτή ακριβώς η μικροδομή καθορίζει τη συμπεριφορά του υλικού σε κόπωση και σε ενδεχόμενη ανάπτυξη ρωγμής. Η ανάπτυξη της ρωγμής εμποδίζεται στο τελικό στάδιο της διαδικασίας διάδοσης από το μαλακό στρώμα του φερρίτη στο σκληρό στρώμα του μπαϊνίτη. Η βασική αρχή λειτουργίας του μηχανισμού παρεμπόδισης της ανάπτυξης της ρωγμής χαρακτηρίζεται από την ανακοπή της ρωγμής από τα στρώματα του μπαϊνίτη είτε από την αναγκαστική λοξοδρόμησή της από την αρχική της διεύθυνσης γύρω από τη φάση του μπαϊνίτη. Στην Εικόνα 2.4 φαίνεται μια σχηματική αναπαράσταση του παραπάνω μηχανισμού.



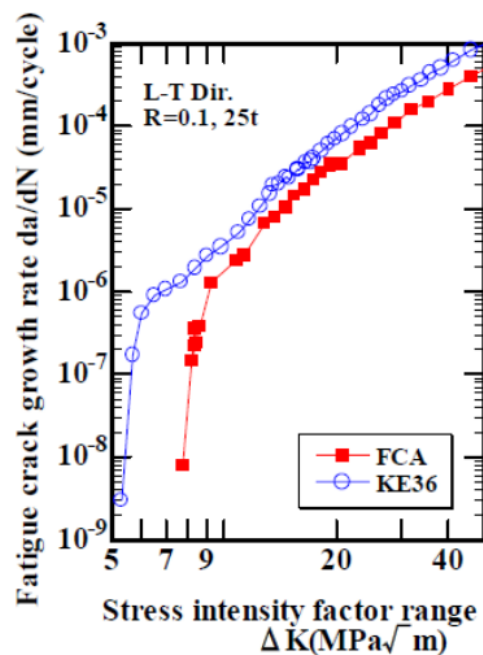
Εικόνα 3.4 Ο μηχανισμός συμπεριφοράς των χαλύβων FCA σε διάδοση ρωγμής από κόπωση

Η παρακάτω εικόνα δείχνει τη συμπεριφορά των χαλύβων FCA σε κόπωση σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής.



Εικόνα 3.5 Συγκριτική συμπεριφορά χαλύβων FCA σε κόπωση σε σχέση με συμβατικούς χάλυβες υψηλής αντοχής

Ένας ακόμα λειτουργικός μηχανισμός των χαλύβων FCA, που συμβάλει στη βελτίωση της συμπεριφοράς τους σε κόπωση, είναι η αποφυγή της δημιουργίας εγκοπής στο υλικό (material notch effect). Το φαινόμενο αυτό εμφανίζεται όταν υπάρχει συσσώρευση τάσεων σε ένα σημείο της επιφάνειας του υλικού. Η ανισοκατανομή της σκληρότητας του υλικού, δηλαδή η ύπαρξη περιοχών με αισθητά μεγαλύτερες τιμές σκληρότητας σε σχέση με άλλες γειτονικές περιοχές, μπορεί να οδηγήσει στη συσσώρευση τάσεων. Οι χάλυβες FCA έχουν ομοιογενή κατανομή της σκληρότητας κατά τον όγκο τους. Η ομοιογενής κατανομή της σκληρότητας είναι μια ιδιότητα που επίσης προσδίδεται μέσω της διαδικασίας παραγωγής των χαλύβων FCA.



Εικόνα 3.6 Ρυθμός ανάπτυξης ρωγμής κόπωσης συναρτήσει του εύρους του συντελεστή εντατικής κατάστασης ΔK , σε περιβάλλον ατμοσφαιρικού αέρα

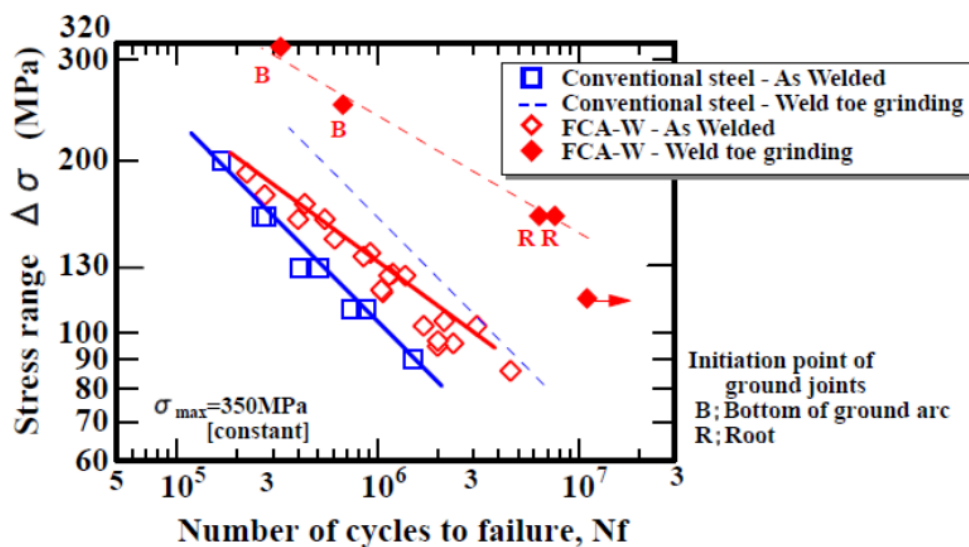
3.3 Βελτιωτικές τεχνικές κατεργασίας συγκολλήσεων τεμαχίων χάλυβα FCA. [6], [7]

Όπως το σύνολο των χαλύβων έτσι και οι χάλυβες της οικογένειας FCA μπορούν να δεχτούν κατεργασίες που βελτιώνουν την αντοχή τους σε κόπωση μετά το πέρας συγκολλήσεων. Οι κατεργασίες αυτές είναι οι:

- > Επένδυση με τη χρήση TIG (TIG dressing)
- > Λείανση της βάσης της ραφής (Toe grinding)
- > Υπερηχητική Κρούση (Ultrasonic Peening)

Οι μέθοδοι της υπερηχητικής κρούσης (UP ή Ultrasonic Peening) και της λείανσης της βάσης της ραφής (Toe Grinding) είναι οι δύο κύριες μέθοδοι που βρίσκουν μεγάλη εφαρμογή στους χάλυβες της οικογένειας FCA.

Το παρακάτω διάγραμμα δείχνει τη συμπεριφορά σε κόπωση συγκολλήσεων συμβατικού χάλυβα και χάλυβα FCA πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου της λείανσης της βάσης τη ραφής. Είναι εμφανές ότι με τη συγκεκριμένη μέθοδο η διάρκεια ζωής των τεμαχίων σε κόπωση, αυξάνεται πάνω από 200%.



Εικόνα 3.7 Συγκριτική συμπεριφορά συγκολλημένων τεμαχίων χάλυβα πριν και μετά την εφαρμογή της μεθόδου λείανσης της βάσης της ραφής.

Η μέθοδος της υπερηχητικής κρούσης επιδρά αυξητικά στη διάρκεια ζωής συγκολλημένων τεμαχίων που δέχονται καταπονήσεις κόπωσης, εισάγοντας θλιπτικές παραμένουσες τάσεις στα επιφανειακά στρώματα της ραφής της συγκόλλησης. Αυτή η διαδικασία έχει σαν αποτέλεσμα τη μείωση της συγκέντρωσης τάσεων και την ενίσχυση των μηχανικών ιδιοτήτων του επιφανειακού στρώματος του υλικού. Με τη μέθοδο αυτή εμφανίζεται επίσης, εκλέπτυνση των κόκκων της κατεργασμένης επιφάνειας.

3.4 Χρήση των χαλύβων FCA στη Ναυπηγική Βιομηχανία. [2], [8]

Οι χάλυβες της οικογένειας FCA είναι χάλυβες υψηλής αντοχής που συνεισφέρουν στην υψηλότερη λειτουργική ζωή των ναυπηγικών κατασκευών, στη μείωση του βάρους τους και κατά συνέπεια συνολικά στη μείωση των εκπομπών CO₂. Η πρώτη εταιρία που χρησιμοποίησε χάλυβες FCA στις κατασκευές της ήταν η Mitsubishi Heavy Industries όπου το 2003

χρησιμοποίησε κατασκευαστικά στοιχεία διπύθμενου ενός πλοίου μεταφοράς υγροποιημένου αερίου LPG που ήταν κατασκευασμένα από χάλυβα FCA. Η εταιρία Mitsui Engineering & Shipbuilding εφάρμοσε σε διάφορες κρίσιμες περιοχές της γάστρας ενός cape size πλοίου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), ελάσματα από χάλυβα FCA. Οι χάλυβες της οικογένειας FCA έχουν βρει μεγάλη εφαρμογή σε καλύμματα δεξαμενών πλοίων μεταφοράς υγροποιημένου φυσικού αερίου LNG. Οι μεγαλύτερες κατασκευάστριες εταιρίες όπως η Kawasaki Heavy Industries, η Mitsui που αναφέρθηκε και πριν και η Sumimoto Metal, έχουν κάνει μελέτες για την κατασκευή ενισχυτικών και κατασκευαστικών στοιχείων πλοίων από χάλυβα FCA. Οι μελέτες αυτές καταδεικνύουν αποτελεσματική επίδραση της εφαρμογής FCA από άποψη σχεδιασμού κόπωσης. Πιο συγκεκριμένα έχουν προταθεί:

- Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικού τοιχώματος για πλοίο τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier), μεγέθους cape size.
- Ενισχυτικά πυθμένα και πλευρικού τοιχώματος για δεξαμενόπλοιο τύπου VLCC.
- Γωνίες υδατοστεγών καλυμμάτων κυτών φορτίου (hatch corners) για πλοίο τύπου μεταφοράς εμπορευματοκιβωτίων (containership).

Όλα τα παραπάνω ξεπέρασαν κατά πολύ τα όρια ζωής που ορίζουν οι κανονισμοί του CSR και μεγάλων νηογνομόνων όπως ο ABS.

Έρευνες, αν και όχι τόσο εκτεταμένες, για τις εφαρμογές των χαλύβων FCA έχουν γίνει για τις εξής περιπτώσεις:

- Στα σημεία που το έλασμα του πυθμένα συναντά το έλασμα hopper σε πλοία τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier).
- Στα καλύμματα στομίων κυτών σε πλοία τύπου μεταφοράς φορτίου χύδην (bulk carrier).
- Σε εγκάρσιες πτυχωτές φρακτές σε πλοία οχηματαγωγά πλοία τύπου Ro/Ro.
- Στα σημεία που συναντά το έλασμα του κυρίου καταστρώματος τα ελάσματα των καλυμμάτων των δεξαμενών σε πλοία μεταφοράς LNG.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 3

- [1] K. Nobury, I. Akimori, A. Kazushige, T. Yukichi, Y. Takumi, I. Lotsberg, *A proposed Design S-N Curve for steels with improved Fatigue Resistance (FCA Steels)*, Tokyo 2010.
- [2] Nippon Steel & Sumimoto Metal, *Fatigue Solutions of Nippon Steel & Sumimoto Metal*, Tokyo 2012.
- [3] JFE Steel Corp., *Steel Plates*, JFE Steel Corp., Japan 2012.
- [4] Γ. Δ. Χρυσουλάκης, Δ. Ι. Παντελής, *Επιστήμη και τεχνολογία των μεταλλικών υλικών*, Εκδόσεις Παπασωτηρίου, Αθήνα 2007.
- [5] Β. Ι. Παπάζογλου, *Ναυπηγική Τεχνολογία*, Πανεπιστημιακές Σημειώσεις, Εκδόσεις Ε.Μ.Π., Αθήνα 1995.
- [6] J. Kudryatsef, J. Kleinman, G. Prokopenko, V. Knysh, L. Gimbrede, *Effect of Ultrasonic Peening on Microhardness and Residual Stress in Material and Welded Elements*, Integrity Testing Laboratory Inc., Ontario Canada 2004.
- [7] I. Schipperen, J. Andric, D. Brennan, J. D. Caprace, C. M. Chou, J. Gordo, et al, *MATERIALS AND FABRICATION TECHNOLOGY, 114-122*, Scibautechnische Gesellschaft, Rockstoc, Germany 2012.
- [8] Y. Komizo, *Status & Prospects of Shipbuilding Steel and Its Weldability*, Joining and Welding Research Institute, Osaka, Japan 2007.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4^ο

Ανασκόπηση Εργασιών Σχετικών με το θέμα της Διπλωματικής

4.1 Επίδραση της γωνίας λοξοτομής του ελάσματος και του ρυθμού παροχής ηλεκτροδίου στη μέθοδο GMAW. [1]

Οι συγκολλήσεις με τη μέθοδο GMAW έχουν πολλές παραμέτρους που μπορούν να επηρεάσουν το αποτέλεσμα της συγκόλλησης, τόσο από άποψη μηχανικής συμπεριφοράς όσο και μικροδομής. Οι κύριες παράμετροι που αλλάζουν δραματικά το αποτέλεσμα της συγκόλλησης είναι οι συνθήκες ρεύματος, δηλαδή η ένταση του ρεύματος και η τάση του ηλεκτρικού τόξου. Υπάρχουν όμως και παράμετροι «δευτερεύουσας σημασίας» που μπορούν να επηρεάσουν τις ιδιότητες της συγκόλλησης. Οι M. P. Kumar, K. N. Kumar, K. S. Narayana, στην εργασία τους με τίτλο «Effect of Bevel Angel and Wire Feed Rate», προσπάθησαν να παραμετροποιήσουν το αποτέλεσμα που θα είχε στη σκληρότητα της περιοχής της συγκόλλησης καθώς και στη μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό της συγκόλλησης, η αλλαγή της γωνίας λοξοτομής του ελάσματος και η αλλαγή στο ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στη συγκεκριμένη μελέτη είναι ο MS2026 και η χημική του σύσταση φαίνεται στον πίνακα που ακολουθεί.

Πίνακας 4.1 Χημική σύσταση του χάλυβα MS2026

Material	C	P	S	Mn	Si	Al
MS2062	0.18	0.017	0.01	0.79	0.18	0.026

Οι παράμετροι και οι συνθήκες που επιλέχθηκαν για τη διεξαγωγή των πειραμάτων αναφέρονται συνοπτικά στους πίνακες 4.2 και 4.3 αντίστοιχα.

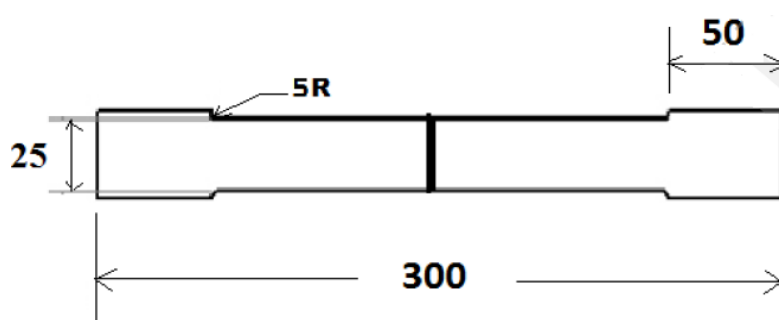
Πίνακας 4.2 Οι παράμετροι της συγκόλλησης

S.No.	Process Parameters	Values
1	Welding Voltage (Volts)	34
2	Bevel Angles	15°, 30°, 45°
3	Wire feed rate (mm/min)	50, 60, 70

Το ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε ήταν τύπου E-2026 διαμέτρου 1.2mm. Επίσης όλα τα δοκίμια εφελκυσμού κόπηκαν σύμφωνα με το πρότυπο ASTM E-8. Αρχικά έγιναν οι λοξοτομές σε γωνίες 15°, 30°, 45° και έπειτα διεξήχθησαν οι συγκολλήσεις με τρεις διαφορετικούς ρυθμούς παροχής ηλεκτροδίου 50, 60, 70 mm/min. Η παράμετρος της τάσης διατηρήθηκε σταθερή στα 35V. Οι διαστάσεις των ελασμάτων ήταν 150 x 270 x 16mm.

Πίνακας 4.3 Συνθήκες συγκόλλησης

Electrode	E2062
Electrode diameter	1.2mm
Shielding Gas	Carbon Dioxide (CO ₂)
Operation type	Semi Automatic



Εικόνα 4.1 Τα δοκίμια εφελκυσμού που χρησιμοποιήθηκαν κατά το πρότυπο δοκιμών ASTM E-8

Οι εφελκυσμοί πραγματοποιήθηκαν σε μηχανή καταπονήσεων τύπου Universal Testing Machine και οι μικροσκληρότητες μετρήθηκαν σύμφωνα με τη μέθοδο Rockwell. Ο Πίνακας 4.4 παρουσιάζει συνοπτικά τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας.

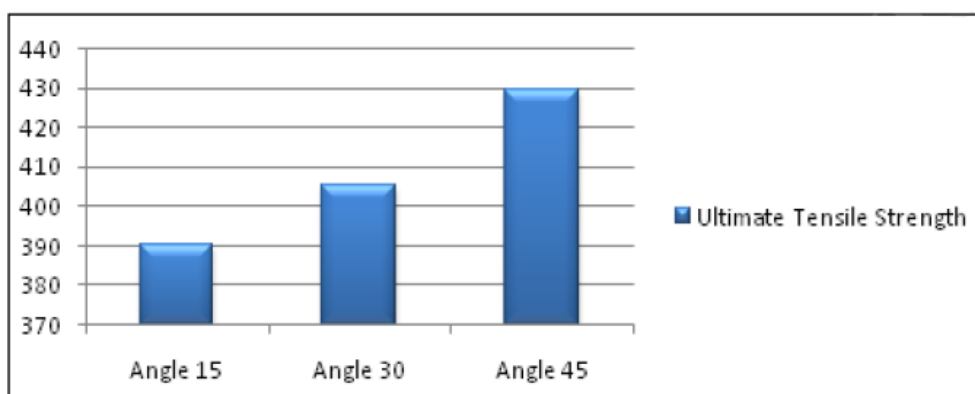
Πίνακας 4.4 Αποτελέσματα μέγιστης αντοχής σε εφελκυσμό και μικροσκληροτήτων κατά Rockwell

Base Metal: UTS=467.675N/mm ²			Hardness=94 RHN	
S. No.	Wire Feed Rate (mm/min)	Bevel Angle (degrees)	Ultimate Tensile Strength (N/mm ²)	Hardness (RH _B)
1	50	15	353.89	86
		30	365.06	58
		45	392.13	57
2	60	15	390.23	85
		30	405.11	81
		45	429.42	50
3	70	15	375.41	89
		30	386.16	78
		45	391.61	68

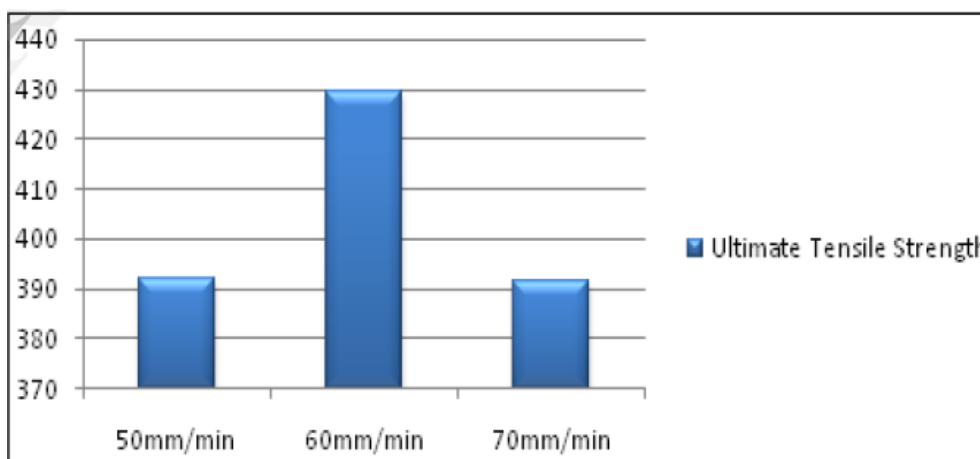
Σύμφωνα με την κατηγοριοποίηση των αποτελεσμάτων στα δοκίμια και των τριών ρυθμών παροχής ηλεκτροδίου, η μέγιστη αντοχή σε εφελκυσμό, παρουσιάζεται στα δοκίμια που είχαν λοξοτομηθεί σε γωνία 45°.

Φαίνεται επίσης από τον Πίνακα 4.4 ότι ο βέλτιστος ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου, είναι 60 mm/min και ότι σε ρυθμούς 50 και 70 mm/min η αντοχή σε εφελκυσμό μειώνεται σημαντικά και διατηρεί κοντινές τιμές.

Τα παρακάτω διαγράμματα δείχνουν την αλλαγή σε αντοχή εφελκυσμού ανάλογα με τη γωνία λοξοτομής για ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου 60 mm/min και ανάλογα με τον ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου για γωνία λοξοτομής 45°.

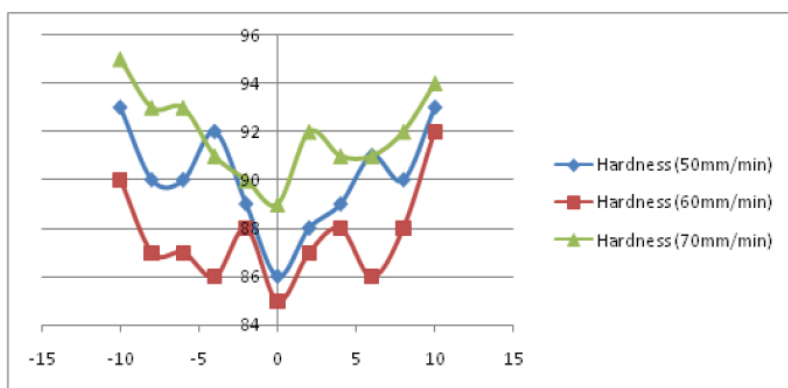


Εικόνα 4.5 Αντοχή σε εφελκυσμό ανάλογα με την γωνία για ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου 60 mm/min

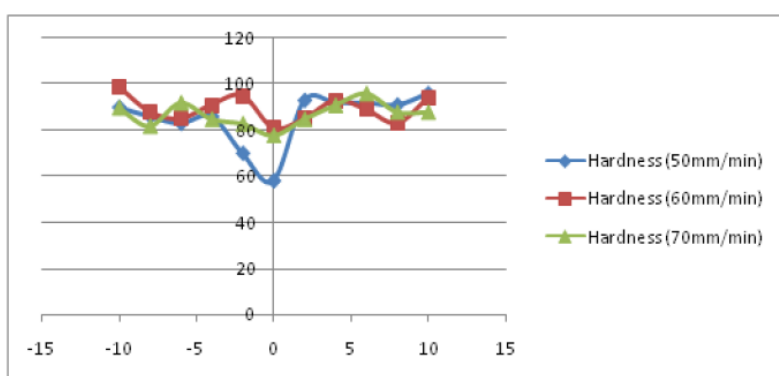


Εικόνα 4.6 Αντοχή σε εφελκυσμό ανάλογα με τον ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου για γωνία λοξοτομής 45°

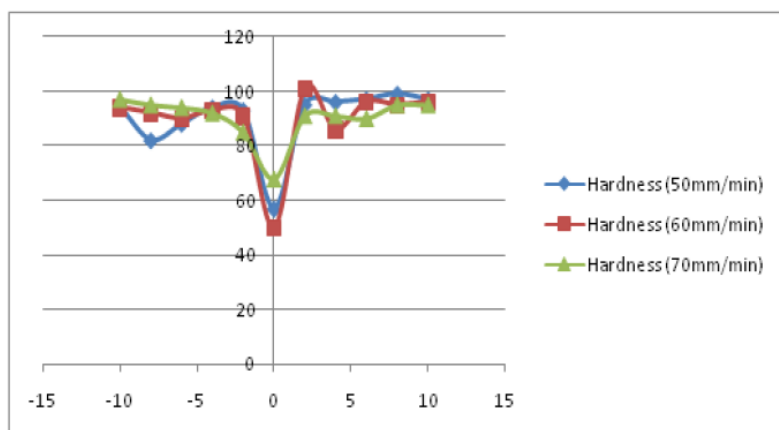
Στον Πίνακα 4.4 παρουσιάζονται ο μέγιστες τιμές μικροσκληρότητας στο μέταλλο συγκόλλησης για κάθε γωνία λοξοτομής και για τους τρεις ρυθμούς παροχή ηλεκτροδίου. Αυτό που αξίζει να αναφερθεί είναι ότι παραδόξως στη μέγιστη τιμή αντοχής σε εφελκυσμό αντιστοιχεί η ελάχιστη τιμή μικροσκληρότητας. Επίσης τα διαγράμματα που ακολουθούν δείχνουν ότι οι τιμές των μικροσκληροτήτων αυξάνονται στην Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη και στο μέταλλο βάσης ενώ εμφανίζουν ελάχιστη τιμή στην περιοχή της ζώνης τήξης.



Εικόνα 4.7 Οριζόντια διασπορά μικροσκληροτήτων για γωνία λοξοτομής 15°



Εικόνα 4.8 Οριζόντια διασπορά μικροσκληροτήτων για γωνία 30°



Εικόνα 4.9 Οριζόντια διασπορά μικροσκληροτήτων για γωνία 45°

4.2 Επίδραση της ενέργειας συγκόλλησης και της αραίωσης του βασικού μετάλλου στη μέθοδο SAW. [2]

Ένας από τους σημαντικότερους παράγοντες που επηρεάζει τις μηχανικές ιδιότητες της συγκόλλησης στις μεθόδους συγκολλήσεων με τήξη, είναι το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας (Heat Input, H.I.). Η θερμότητα που προσδίδεται στην περιοχή της συγκόλλησης

επηρεάζει σε μεγάλο βαθμό το ρυθμό απόψυξης και επομένως τη μικροδομή και τις μηχανικές ιδιότητες του μετάλλου βάσης, ειδικά στην περίπτωση των σιδηρούχων μετάλλων, όπως ο χάλυβας.

Οι A. C. Hunt, A. O. Kluken, G. R. Edwards έκαναν μια μελέτη για την επίδραση που έχει το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας και το ποσοστό αραίωσης του μετάλλου βάσης στις μηχανικές ιδιότητες και τη μικροδομή χαλύβων υψηλής αντοχής, συγκολλημένων με τη μέθοδο SAW. Τα αποτελέσματα της μελέτης αυτής παρουσιάστηκαν στην εργασία με τίτλο «Heat Input and Dilution Effects in Microalloyed Steel Weld Metals».

Τα πειράματα διεξήχθησαν σε δοκίμια χάλυβα ASTM A710 Grade A, πάχους 19mm και χρησιμοποιήθηκε βασική σκόνη σιλλιπάσματος Oerlikon OP121TT. Ο σκοπός της εργασίας ήταν να εξεταστούν δοκίμια χαμηλής (40%) και υψηλής αραίωσης (70%) και να εξεταστεί η συνδυασμένη επίδραση προσδιδόμενης θερμότητας και αραίωσης. Ο πίνακας που ακολουθεί δείχνει τις συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις στα 16 δοκίμια.

Πίνακας 4.5 Συνθήκες υπό τις οποίες πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις

Series No.	Weld No.	Dilution	Amperage (A)	Voltage (V)	Travel Speed (mm/s)	Heat Input (kJ/mm)
I	1	high	680	34	11.5	2.0
	2	high	680	34	7.0	3.3
	3	high	680	34	5.0	4.6
	4	high	665	34	4.3	5.3
	5	low	670	34	11.4	2.0
	6	low	670	34	6.9	3.3
	7	low	670	34	5.0	4.6
	8	low	670	34	4.3	5.3
II	9	high	640	34	10.9	2.0
	10	high	660	34	6.8	3.3
	11	high	660	34	4.9	4.6
	12	high	660	34	4.2	5.3
	13	low	660	34	11.2	2.0
	14	low	660	34	6.8	3.3
	15	low	660	34	4.9	4.6
	16	low	660	34	4.2	5.3

Ο πίνακας 4.6 δείχνει την ακριβή χημική σύσταση που αποκαταστάθηκε μετά την συγκόλληση σε κάθε δοκίμιο.

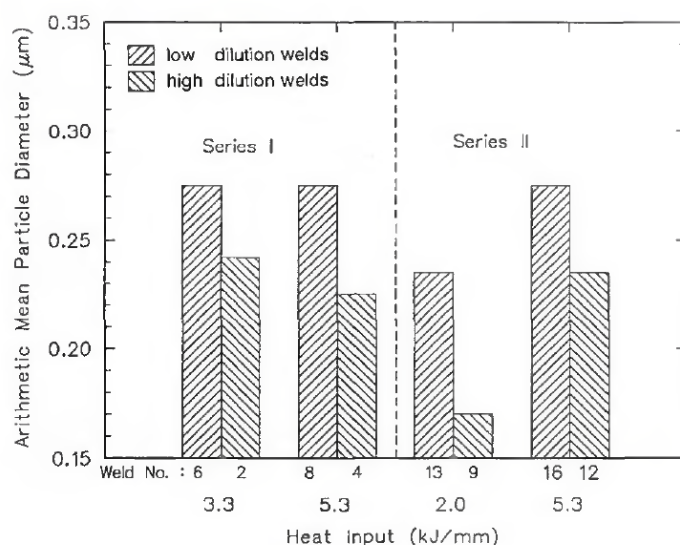
Πίνακας 4.6 Χημική σύσταση δοκιμίων μετά τη συγκόλληση

Series No.	Weld No.	C	Mn	Si	P	S	Cr	Ni	Mo	Nb	Cu	N	Ti	Al	O	B	P _{cm}
I	1 ^a	0.05	0.72	0.29	0.009	0.007	0.52	0.77	0.23	0.033	1.19	0.008	0.007	0.021	250	21	0.220
	2 ^a	0.05	0.75	0.27	0.010	0.006	0.50	0.75	0.23	0.032	1.05	0.008	0.007	0.018	190	21	0.212
	3 ^a	0.05	0.75	0.26	0.010	0.006	0.50	0.75	0.24	0.032	1.04	0.008	0.007	0.018	210	25	0.214
	4 ^a	0.05	0.77	0.27	0.010	0.005	0.49	0.73	0.24	0.031	1.04	0.008	0.007	0.017	210	25	0.215
	5 ^b	0.05	0.98	0.26	0.012	0.005	0.41	0.54	0.27	0.020	0.85	0.008	0.010	0.014	240	26	0.210
	6 ^b	0.05	0.98	0.25	0.011	0.005	0.42	0.55	0.27	0.021	0.81	0.008	0.010	0.015	230	26	0.209
	7 ^b	0.05	0.97	0.24	0.012	0.005	0.40	0.53	0.26	0.020	0.82	0.008	0.009	0.014	230	21	0.204
	8 ^b	0.04	0.98	0.24	0.012	0.005	0.40	0.53	0.27	0.019	0.82	0.008	0.009	0.013	210	25	0.197
II	9 ^a	0.05	0.79	0.35	0.011	0.007	0.56	1.39	0.28	0.033	0.96	0.008	0.004	0.020	210	15	0.227
	10 ^a	0.05	0.82	0.36	0.011	0.007	0.55	1.44	0.29	0.032	0.92	0.008	0.005	0.019	190	14	0.227
	11 ^a	0.05	0.85	0.36	0.012	0.007	0.55	1.49	0.31	0.032	0.89	0.008	0.004	0.017	210	19	0.232
	12 ^a	0.05	0.86	0.36	0.012	0.007	0.54	1.50	0.31	0.031	0.87	0.008	0.005	0.016	200	17	0.230
	13 ^b	0.05	1.10	0.39	0.013	0.006	0.53	1.87	0.37	0.021	0.57	0.007	0.006	0.016	220	12	0.235
	14 ^b	0.05	1.11	0.38	0.014	0.005	0.52	1.89	0.37	0.020	0.56	0.007	0.005	0.015	220	11	0.234
	15 ^b	0.05	1.10	0.39	0.013	0.006	0.52	1.87	0.37	0.021	0.57	0.008	0.006	0.014	220	13	0.235
	16 ^b	0.05	1.12	0.40	0.014	0.006	0.51	1.90	0.37	0.020	0.55	0.007	0.006	0.014	210	11	0.234
Base Plate		0.05	0.54	0.33	0.006	0.006	0.73	0.96	0.20	0.048	1.28	—	0.002	0.038	—	4	0.218

Οι δύο σειρές δοκιμών, I και II, ανταποκρίνονται σε διαφορετικό ηλεκτρόδιο που χρησιμοποιήθηκε. Και τα δύο ηλεκτρόδια είναι συμπαγή και ίδιας διαμέτρου 2.4mm.

Στον Πίνακα 4.6 φαίνεται ότι η δυνατότητα σκλήρυνσης του μετάλλου συγκόλλησης, όπως μετρήθηκε από τον συντελεστή Ito-Bessyo, P_{cm} , επηρεάζεται αμυδρά από την αλλαγή της αραίωσης από 40% σε 70%. Η αυξημένη τιμή του P_{cm} στα δοκίμια της σειράς II ανταποκρίνεται στο υψηλότερο περιεχόμενο σε νικέλιο που έχουν τα δοκίμια αυτής της σειράς σε σχέση με τα δοκίμια της σειράς I.

Τα δοκίμια χαμηλής αραίωσης, παρουσιάζουν αυξημένο μέσο μέγεθος εγκλεισμάτων σε σχέση με τα δοκίμια που ετοιμάστηκαν με υψηλή αραίωση, και φαίνεται ότι και στις δύο περιπτώσεις το μέγεθος των εγκλεισμάτων δεν εξαρτάται από την ενέργεια συγκόλλησης (H.I.). Η διαπίστωση αυτή μπορεί να γίνει εμφανής από το παρακάτω διάγραμμα.



Εικόνα 4.7 Επίδραση της αραίωσης και του Heat Input στο μέγεθος των εγκλεισμάτων.

Ο Πίνακας 4.7 συνοψίζει τα αποτελέσματα της μεταλλογραφικής παρατήρησης που έγινε στα δοκίμια.

Πίνακας 4.7 Η μικροδομή του μετάλλου βάσης στα δοκίμια

Series No.	Weld No.	Dilution	Heat Input (kJ/mm)	GBF (vol-%)	PF (vol-%)	AF (vol-%)	FS(A) (vol-%)	FS(NA) (vol-%)	Acicular Ferrite Lath Spacing (μm)	Prior Austenite Grain Size (μm)
I	1	high	2.0	2	-	3	95	-	-	105
	2	high	3.3	2	-	15	83	-	-	140
	3	high	4.6	3	-	89	8	-	3.3	163
	4	high	5.3	4	3	85	8	-	3.4	200
	5	low	2.0	2	4	91	-	3	2.2	106
	6	low	3.3	1	2	91	-	6	2.4	158
	7	low	4.6	7	6	87	-	-	2.3	-
	8	low	5.3	11	7	80	-	2	2.3	207
II	9	high	2.0	2	-	5	93	-	-	79
	10	high	3.3	3	-	5	92	-	-	83
	11	high	4.6	3	2	41	54	-	3.7	83
	12	high	5.3	3	2	48	47	-	4.2	96
	13	low	2.0	3	3	89	-	5	2.3	85
	14	low	3.3	5	4	84	-	7	2.9	-
	15	low	4.6	9	4	82	-	5	2.8	-
	16	low	5.3	9	3	83	-	5	2.7	111

Note: GBF: Grain Boundary Ferrite, PF: Polygonal ferrite, AF: Acicular Ferrite, FS(A): Ferrite with Aligned Second Phase, FS(NA): Ferrite with Non-Aligned Second Phase

Από τον Πίνακα 4.7 φαίνεται ότι η ανάπτυξη του πρωτεύοντος ωστενίτη στη Σειρά I εξαρτάται από την ενέργεια συγκόλλησης ενώ στη Σειρά II είναι σχετικά ανεξάρτητα μεγέθη. Το γεγονός αυτό μπορεί να σχετίζεται με το ότι τα δοκίμια τη Σειράς II έχουν μεγαλύτερα ποσοστά κραματικών στοιχείων από ότι τα δοκίμια της Σειράς I.

Επίσης γίνεται εμφανές ότι η αλλαγή φάσης των μετάλλων βάσης και των δύο Σειρών δοκιμών εξαρτάται από το ποσό της προσδιδόμενης ενέργειας. Στις συγκολλήσεις που πραγματοποιήθηκαν με μεγάλα ποσά προσδιδόμενης ενέργειας, παρατηρείται η ανάπτυξη βελονοειδούς φερρίτη (acicular ferrite). Παρατηρείται επίσης ότι η δημιουργία βελονοειδούς φερρίτη λαμβάνει χώρα κυρίως στα δοκίμια υψηλής αραίωσης όταν το ποσό της προσδιδόμενης θερμότητας διατηρείται σε σχετικά χαμηλά επίπεδα.

Ο πίνακας 4.8 δείχνει τις μηχανικές ιδιότητες των δοκιμών μετά συγκόλληση.

Πίνακας 4.8 Μηχανικές ιδιότητες δοκιμών

Series No.	Weld No.	Dilution	Heat Input (kJ/mm)	Hardness HV _{0.5} (kg/mm ²)	Yield Strength (MPa)	50% FATT (°C)
I	1	high	2.0	257	649	6
	2	high	3.3	227	576	-10
	3	high	4.6	224	556	-40
	4	high	5.3	226	538	-60
	5	low	2.0	234	571	-126
	6	low	3.3	217	561	-126
	7	low	4.6	213	552	-106
	8	low	5.3	209	541	-106
II	9	high	2.0	259	678	6
	10	high	3.3	239	636	7
	11	high	4.6	223	601	-15
	12	high	5.3	230	585	-40
	13	low	2.0	252	592	-73
	14	low	3.3	241	555	-64
	15	low	4.6	231	547	-68
	16	low	5.3	229	543	-64

Σύμφωνα με την παραπάνω μελέτη μπορεί κανείς να καταλήξει ότι στα δοκίμια χαμηλής αραίωσης το μέσο μέγεθος των εγκλεισμάτων ήταν μεγαλύτερο από ότι στα δοκίμια υψηλής αραίωσης. Επίσης στη μικροδομή των δοκιμών χαμηλής αραίωσης παρατηρήθηκε σημαντικά αυξημένο ποσοστό βελονοειδούς φερρίτη.

Γίνεται αντιληπτό ότι η συγκολλησιμότητα (όπως μετράται με το συντελεστή P_{cm}) που εμφανίζει το μέταλλο συγκόλλησης δεν επηρεάζεται από το αν υπάρχει χαμηλή ή υψηλή αραίωση στο μέταλλο βάσης.

Επίσης στα δοκίμια χαμηλής αραίωσης, παρατηρήθηκε ότι η σύνθεση της μικροδομής είναι ανεξάρτητη από τη διακύμανση της προσδιδόμενης ενέργειας, σε αντίθεση με τα δοκίμια υψηλής αραίωσης όπου η διακύμανση της θερμότητας επηρέαζε σημαντικά τη μικροδομή.

Τέλος γίνεται εμφανής η ανάγκη περεταίρω διερεύνησης της επίδρασης που έχουν οι επαναλαμβανόμενοι θερμικοί κύκλοι στη μικροδομή και στο ποσοστό των εγκλεισμάτων που εμφανίζεται στη μικροδομή των συγκολλημένων μικροκραματωμένων χαλύβων.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 4

- [1] M. P. Kumar, K. N. Kumar, K. S. Narayana, *Effect of Bevel Angle and Wire Feed Rate in MIG Welding*, International Journal of Engineering Research & Technology, Vol 2, Issue 8, 2013.
- [2] A. C. Hunt, A. O. Kluken, G. R. Edwards, *Heat Input and Dilution Effects in Microalloyed Steel Weld Metals*, Welding Journal, Vol 73, New York 1994.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5^ο

Πειραματικό Μέρος

5.1 Εισαγωγή

Η πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας, αφορά στην προετοιμασία, τη διεξαγωγή και τη μελέτη δοκιμών συγκόλλησης με τη μέθοδο MCAW. Η πειραματική διαδικασία ξεκίνησε με την προετοιμασία των ελασμάτων που θα συγκολληθούν, την επιλογή των υλικών και των αναλωσίμων της συγκόλλησης. Έπειτα καθορίστηκαν οι παράμετροι με τις οποίες διεξήχθησαν οι συγκολλήσεις με σκοπό τη δημιουργία τεσσάρων συγκολλήσεων που διαφοροποιούνται ως προς την ενέργεια συγκόλλησης με την οποία πραγματοποιούνται. Μετά τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων, χρησιμοποιήθηκε η μέθοδος της τυφλής οπής, για τη μέτρηση παραμενουσών τάσεων. Έπειτα ετοιμάστηκαν δοκίμια, και από τις τέσσερις συγκολλήσεις με σκοπό τη μέτρηση μικροσκληροτήτων στις περιοχές του μετάλλου συγκόλλησης και της θερμικά επηρεασμένης ζώνης. Τέλος πραγματοποιήθηκε λεπτομερής μεταλλογραφία των δοκιμών, τόσο μακροσκοπικά όσο και μικροσκοπικά, προκειμένου να εξαχθούν συμπεράσματα για την επιρροή της ενέργειας συγκόλλησης στη μικροδομή του υλικού.

5.2 Υλικά του πειράματος – Προετοιμασία.

5.2.1 Σύσταση του Χάλυβα – Μετάλλου Βάσης.

Ο χάλυβας που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία της παρούσας διπλωματικής εργασίας είναι κατασκευασμένος με μεθόδους TMCP και κωδικοποιείται ως AH 40 FCA (Fatigue Crack Arrestor). Η χημική σύσταση του χάλυβα σύμφωνα με τον κατασκευαστή Nippon Steel & Sumimoto Metals δίνεται στον Πίνακα 5.1.

Πίνακας 5.1 Χημική Σύσταση (wt%) Χαλύβδινων Πλακών AH 40 – FCA (Μέταλλο Βάσης).

Στοιχείο	C	Si	Mn	P	S	Cu
wt %	0.0425	0.41	1.45	0.013	0.002	0.02
Στοιχείο	Ni	Cr	Mo	Ti	Nb	Sol/Al
wt %	0.02	0.16	0.01	0.008	0.017	0.027

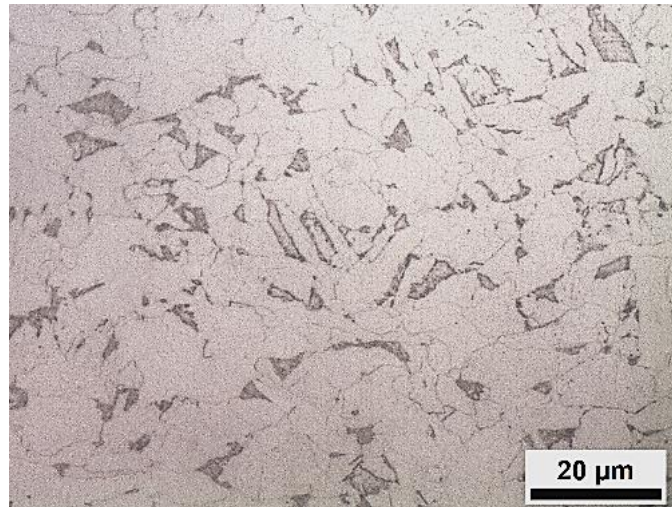
Οι χάλυβες της οικογένειας FCA, όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 3, παρουσιάζουν εξαιρετικές μηχανικές ιδιότητες και αυξημένη αντοχή σε κόπωση. Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στην πειραματική διαδικασία, παρατίθενται στον Πίνακα 5.2, όπως παρέχονται από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 5.2 Μηχανικές Ιδιότητες Χαλύβδινων Πλακών AH 40 - FCA

Όριο Διαρροής Re [N/mm ²]	Αντοχή σε Εφελκυσμό Rm [N/mm ²]	Επιμήκυνση A %	Λόγος Re/Rm	Δυσθραυστότητα (0 °C) KV [J]
421	575	27	0.732	394

Οι μηχανικές ιδιότητες του χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε, οφείλονται στη μικροδομή του, που έχει επιτευχθεί μέσα από τις μεθόδους παραγωγής TMCP. Η μικροδομή του χάλυβα αποτελείται από φερρίτη και μπαινίτη και αποκτάται μέσω θερμής έλασης στην περιοχή της

θερμοκρασίας ανακρυστάλλωσης και ταχείας αποψύξεως. Η μικροδομή του χάλυβα φαίνεται στην Εικόνα 5.1.



Εικόνα 5.1 Μικροδομή του χάλυβα AH40 (Base Metal), σε οπτικό μικροσκόπιο x1000

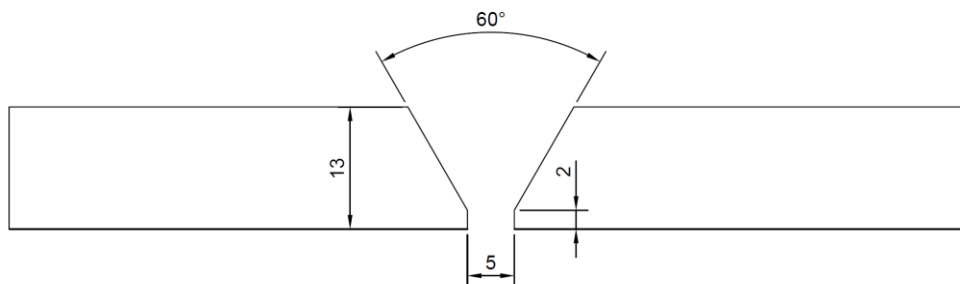
Για το συγκεκριμένο χάλυβα, ο συντελεστής ισοδύναμου άνθρακα, CE_{IIW} , δίνεται από την παρακάτω εξίσωση:

$$C_{IIW} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + Mo + V)}{5} + \frac{(Ni + Cu)}{15} (\%) \quad (1)$$

Από την Εξίσωση (1), και από την χημική σύσταση του χάλυβα, από τον Πίνακα 5.1, έχουμε ότι $CE_{IIW} = 0.32$. Σύμφωνα με την τιμή του συντελεστή ισοδύναμου άνθρακα, ο χάλυβας που θα χρησιμοποιηθεί στα πειράματα, χαρακτηρίζεται από εξαιρετική συγκολλησιμότητα.

5.2.2 Προετοιμασία Χαλύβδινων Ελασμάτων.

Τα ελάσματα που ετοιμάστηκαν προς συγκόλληση είχαν διαστάσεις 350 x 150 mm και πάχος 13 mm. Για την επιτυχή συγκόλληση των δοκιμίων σύμφωνα με το πρότυπο AWS D1.1: Structural Welding Code – Steel (2000), για συγκολλήσεις της οικογένειας MIG, και πάχος ελάσματος 13mm, θα πρέπει τα ελάσματα να έχουν στις προς συγκόλληση ακμές, λοξοτομή συμμετρικής γωνίας 60°, ύψος ποδός 2 mm, και απόσταση μεταξύ τους 5 mm. Η σχηματική αναπαράσταση της διαμόρφωσης των ακμών των προς συγκόλληση ελασμάτων φαίνεται στην Εικόνα 5.2



Εικόνα 5.2 Σχηματική αναπαράσταση διαμόρφωσης ακμής προς συγκόλληση ελασμάτων, κατά το πρότυπο AWS D1.1 (2000)

Για την απόλυτη συγκράτηση των ελασμάτων στο διάκενο των 5mm, όπως ορίζεται από το πρότυπο που επιλέχτηκε, στα άκρα των ελασμάτων – που τοποθετούνται ανά ζεύγη – συγκολλήθηκαν ελάσματα μικρών διαστάσεων που χρησιμοποιήθηκαν σαν αποστάτες.

Πέρα από τη μόνιμη συγκράτηση των ελασμάτων για τη διαδικασία της συγκόλλησης, οι αποστάτες αυτοί, αξιοποιήθηκαν για τη σωστή έναρξη του ηλεκτρικού τόξου της συγκόλλησης, προκειμένου να επιτευχθούν οι κατάλληλες συνθήκες τόξου σε όλο το ενεργό μήκος των ελασμάτων. Όλα τα δοκίμια που προκύπτουν από τα συγκολλημένα ελάσματα, κόβονται από κατάλληλες περιοχές της συγκόλλησης, σύμφωνα με το πρότυπο EN ISO 15614-1:2004. Σύμφωνα με το πρότυπο αυτό για ελάσματα που έχουν συγκολληθεί με μετωπική συγκόλληση, μονής λοξοτομής, τα πρώτα 25mm από την κάθε μεριά της ραφής θεωρούνται περιοχή από την οποία δεν μπορούν να αντληθούν δοκίμια μεταλλογραφίας ή μηχανικών δοκιμών και έτσι απορρίπτονται. Παρόλα αυτά θεωρήθηκε απαραίτητη η χρήση των μεταλλικών αποστατών ως την περιοχή που θα εκκινήσει το ηλεκτρικό τόξο, προκειμένου να επιτευχθεί όσο το δυνατόν καλύτερη συγκόλληση, ακόμα και στα άκρα των ελασμάτων.

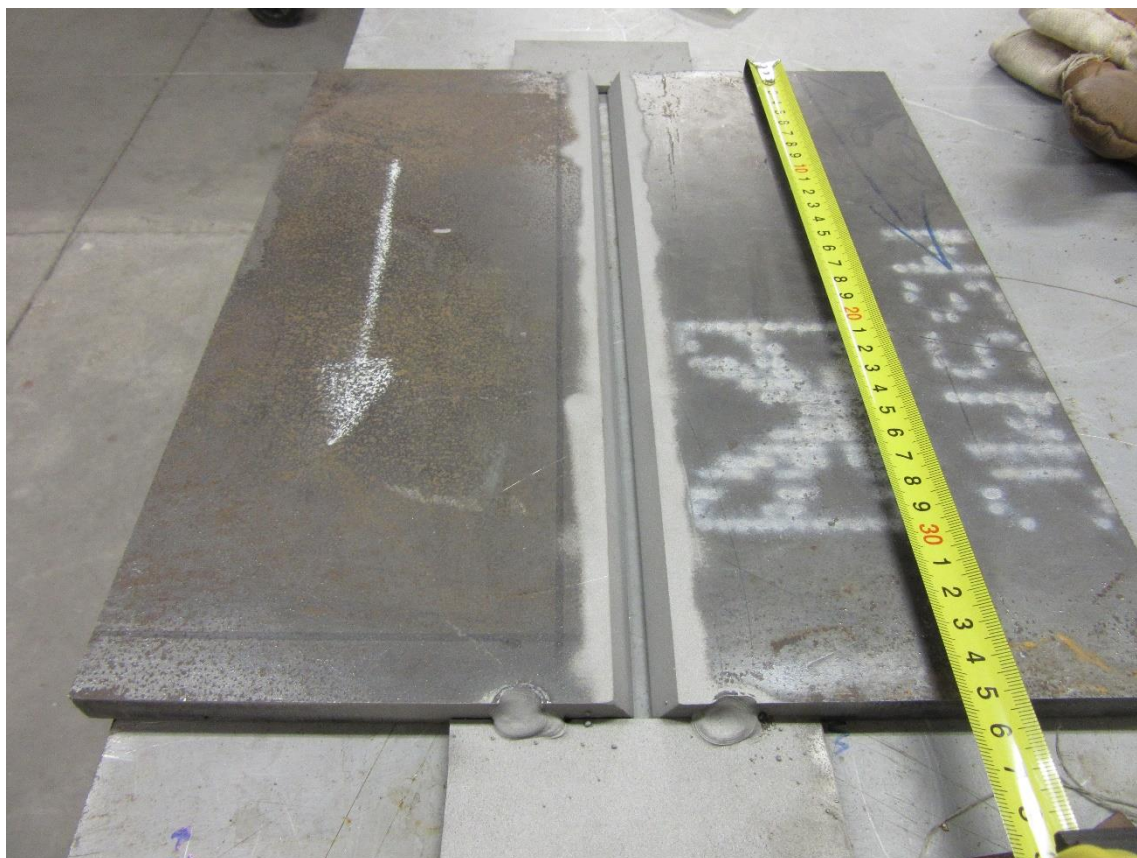
Οι μεταλλικοί αποστάτες συγκολλήθηκαν με πόντες χρησιμοποιώντας τη χειροκίνητη μέθοδο συγκόλλησης SMAW. Επίσης πριν τη διαδικασία της συγκόλλησης, σε όλα τα δοκίμια τοποθετήθηκε κεραμική επικαλύπτρα (βλ. Εικ. 5.2), στην περιοχή της ρίζας, προκειμένου να συγκρατήσει τη λίμνη συγκόλλησης κατά το πρώτο πάσο (Root Pass) και να εξασφαλιστεί σωστή γεωμετρία στην περιοχή της ρίζας.

Τέλος, οι προς συγκόλληση ακμές των ελασμάτων του χάλυβα καθαρίστηκαν με τη διαδικασία της αμμοβολής προκειμένου να απομακρυνθεί το επιφανειακό στρώμα σκουριάς και τυχόν έλαια, βερνίκια και άλλες ακαθαρσίες που ήταν πιθανό να υπάρχουν. Η διαδικασία αυτή αποτελεί σημαντικό κομμάτι της προετοιμασίας διότι όσο πιο καθαρή είναι η προς συγκόλληση επιφάνεια, τόσο περισσότερο μειώνεται η πιθανότητα να εμφανιστούν ατέλειες στη συγκόλληση.



Εικόνα 5.2 Τοποθέτηση της κεραμικής επικαλύπτρας στο κάτω μέρος των προς συγκόλληση ελασμάτων. Φαίνεται δείγμα της επικαλύπτρας.

Η Εικόνα 5.3 δείχνει το δοκίμιο που έχει περάσει όλη τη διαδικασία προετοιμασίας και είναι έτοιμο για τη συγκόλλησή του.



Εικόνα 5.3 Δοκίμιο προς συγκόλληση μετά την αμμοβολή. Στα άκρα φαίνονται οι μεταλλικοί αποστάτες που συγκολλήθηκαν στα ελάσματα.

5.2.3 Ηλεκτρόδιο, Αέριο Προστασίας, Μηχανή Συγκόλλησης και Ρομποτικός Βραχίονας.

Το μέταλλο προσθήκης στις μεθόδους ηλεκτρικού τόξου, τροφοδοτείται, όπως έχει αναφερθεί, στη συγκόλληση, με τη μορφή ηλεκτροδίου. Για τη διεξαγωγή των πειραμάτων της παρούσας διπλωματικής εργασίας, επιλέχθηκε ηλεκτρόδιο από τον κατάλογο της εταιρίας Bohler, και είναι το HL 51-FD. Η κωδικοποίηση του συγκεκριμένου ηλεκτροδίου κατά το πρότυπο EN ISO 17632-A είναι T 46 4 M M 1 H 5.

Πίνακας 5.3 Χημική Σύσταση (wt%) μετάλλου προσθήκης

Στοιχείο	C	Si	Mn
wt (%)	0.07	0.7	1.5

Ο πυρήνας του ηλεκτροδίου, αποτελείται από μεταλλική σκόνη και η συνολική χημική του σύσταση φαίνεται στον Πίνακα 5.3. Αντίστοιχα οι μηχανικές του ιδιότητες παρουσιάζονται στον Πίνακα 5.4.

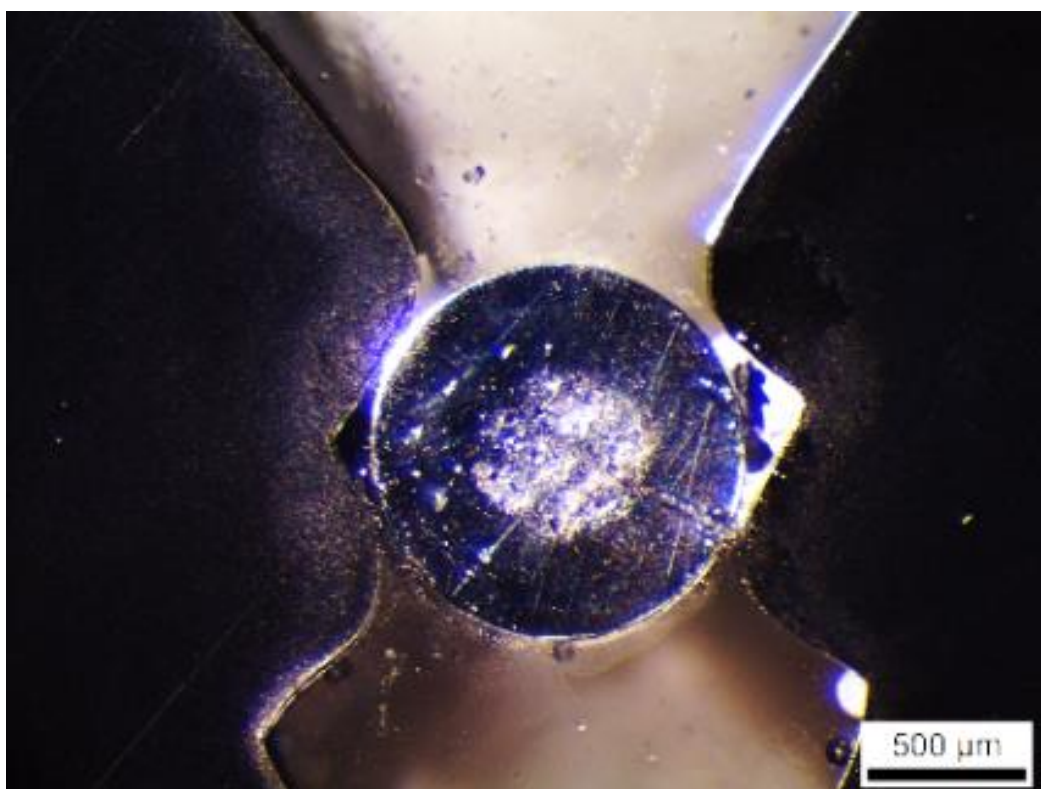
Το ηλεκτρόδιο αυτό, σύμφωνα με τον κατασκευαστή, ενδείκνυται για χάλυβες κατηγορίας AH όταν αυτοί έχουν όριο διαρροής $Re \leq 460 \frac{N}{mm^2}$.

Πέραν αυτών, η επιλογή του συγκεκριμένου ηλεκτροδίου έγινε και βάσει της παρόμοιας χημικής του σύστασης με τη χημική σύσταση του μετάλλου βάσης (AH40, Πίνακας 5.1).

Πίνακας 5.4 Μηχανικές Ιδιότητες Μετάλλου Προσθήκης.

Όριο Διαρροής Re [N/mm ²]	Αντοχή σε Εφελκυσμό Rm [N/mm ²]	Επιμήκυνση A %	Δυσθραυστότητα (+20°C) KV [J]	Δυσθραυστότητα (-40°C) KV [J]
490	610	27	130	90

Η ονομαστική διάμετρος του ηλεκτροδίου είναι 1.2mm. Σύμφωνα με τον κατασκευαστή του ηλεκτροδίου το καταλληλότερο αέριο προστασίας για τη χρήση του ηλεκτροδίου που επιλέχτηκε είναι μίγμα Argon – CO₂ με περιεκτικότητα 15 – 25% CO₂.



Εικόνα 5.4 Φωτογραφική Απεικόνιση του Ηλεκτροδίου HL 51-FD. Φαίνεται το μεταλλικό περίβλημα και η σκόνη του πυρήνα.

Η διεξαγωγή των συγκολλήσεων με τη μέθοδο MCAW, απαιτεί την ύπαρξη προστατευτικού αερίου, προκειμένου να προστατεύεται η λίμνη της συγκόλλησης από τα στοιχεία του ατμοσφαιρικού αέρα. Η προστασία από τον ατμοσφαιρικό αέρα κρίνεται απαραίτητη, έτσι ώστε να αποφευχθεί η ύπαρξη ανεπιθύμητων στοιχείων στο εσωτερικό του μετάλλου συγκόλλησης που προκύπτουν από την αντίδραση διαφόρων κραματικών στοιχείων της λίμνης

συγκόλλησης με τον ατμοσφαιρικό αέρα, όπως έχει αναλυθεί στο Κεφαλαίο 1 της παρούσας διπλωματικής.

Στη διεξαγωγή των συγκολλήσεων της πειραματικής διαδικασίας της παρούσας διπλωματικής εργασίας χρησιμοποιήθηκε αέριο μίγμα προστασίας Argon + 18% CO₂.



Εικόνα 5.5 Φιάλη μίγματος αερίου προστασίας της συγκολλητικής διάταξης. Διακρίνεται ο ρυθμιστής πίεσης που ελέγχει την παροχή του αερίου.

Η μηχανή της συγκόλλησης που χρησιμοποιήθηκε για τη διεξαγωγή των συγκολλήσεων, είναι το μοντέλο TransPulse Synergic 4000 του οίκου Fronius® και παραχωρήθηκε από την εταιρία VETA S.A. Οι τεχνικές προδιαγραφές της μηχανής, που δίνονται από τον κατασκευαστή φαίνονται στον Πίνακα 5.5.

Η μηχανή συγκόλλησης που επιλέχτηκε (βλ. Εικ. 5.6) έχει πλήρεις δυνατότητες συνεργειακής μηχανής. Οι συνεργειακές Μηχανές Συγκόλλησης, έχουν τη δυνατότητα παροχής παλμών ρεύματος τέτοιους ώστε, τα σταγονίδια του τηγμένου μετάλλου που αποκολλώνται από το τηκόμενο ηλεκτρόδιο, να έχουν πανομοιότυπα γεωμετρικά χαρακτηριστικά, ελέγχοντας ταυτόχρονα τη σταθερότητα των ηλεκτρικών χαρακτηριστικών του τόξου και της ομαλής τήξης του ηλεκτροδίου. Η δυνατότητα αυτή παρέχεται μέσω προκαθορισμένων ρυθμίσεων σχετικά με τη διάμετρο του ηλεκτροδίου, το υλικό από το οποίο είναι κατασκευασμένο και την προσφερόμενη στη συγκόλληση ενέργεια και δημιουργούν τις ιδανικές συνθήκες συγκόλλησης για κάθε περίπτωση. Οι σύγχρονες συνεργειακές μηχανές, μπορούν να προσαρμοστούν σε μεγάλη ποικιλία αναλωσίμων, συμπεριλαμβανομένων σωληνοειδών ηλεκτροδίων με προστατευτική ή μεταλλική σκόνη πυρήνα.

Τα τρία βασικά χαρακτηριστικά των μηχανών συνεργειακής λειτουργίας είναι

1. Οι συνθήκες του παλμού επιλέγονται αυτόματα.
2. Η διάρκεια ή η συχνότητα του παλμού σχετίζεται άμεσα με το ρυθμό παροχής ηλεκτροδίου.
3. Η ηλεκτρονική διαχείριση των παραμέτρων εξασφαλίζει ομοιόμορφη διείσδυση συγκόλλησης και μορφή ραφής.

Στην πράξη, η συνεργειακή λειτουργία επιτρέπει στο χειριστή να προεπιλέξει το υλικό του ηλεκτροδίου και τη διάμετρό του και έπειτα να ρυθμίσει το ρυθμό παροχή ηλεκτροδίου. Η λειτουργία «ενός κομβίου» είναι το κυρίαρχο πλεονέκτημα τέτοιων συστημάτων σε σχέση με τις μη συνεργειακές – συμβατικές μηχανές συγκόλλησης.



Εικόνα 5.6 Η μηχανή συγκόλληση TransPuls Synergy 4000. Στην εικόνα δεξιά φαίνεται το χειριστήριο πάνελ της μηχανής.

Πίνακας 5.5 Τεχνικές προδιαγραφές μηχανής συγκόλλησης TransPuls Synergy 4000.

TS 4000	
Line Voltage	3 x 400 V
Line Voltage Tolerance	15% +/-
Line Fusion protection	35 A
Primary continuous Power (100% d.c.)	12.4 kVA
Cos phi	0.99
Welding Curent Range	
MIG/MAG	3 - 400 A
TIG	3 - 400 A
Electrode (MMA)	10 - 400 A
Duty Cycle at 10 min 40°C	50 % d.c. 400 A 100% d.c 320 A
Open-Circuit voltage	70 V
Operating voltage	14.2 - 34.0 V
Degree of protection	IP 23
Dimensions L/W/H	625 / 290 / 475 mm
Weight	35.2 kg

Οι συγκολλήσεις των ελασμάτων που χρησιμοποιήθηκαν στην παρούσα διπλωματική εργασία έγιναν με τη βοήθεια ρομποτικού βραχίονα (Εικ. 5.7, 5.8). Ο ρομποτικό βραχίονας που χρησιμοποιήθηκε είναι της εταιρίας Kawasaki, και έχει κωδικό μοντέλου FA 06E, ο οποίος επίσης παραχωρήθηκε για τη διεξαγωγή των πειραμάτων από την εταιρία VETA S.A.

Η σταθερή ταχύτητα πυρσού συγκόλλησης εξασφαλίζεται από την ελεγχόμενη κίνηση του ρομποτικού βραχίονα.



Εικόνα 5.7 Ο ρομποτικός βραχίονας Kawasaki FA 06E



Εικόνα 5.8 Στη φωτογραφία φαίνονται η μηχανή τροφοδοσίας του ηλεκτροδίου, η προσαρμογή του πυρσού συγκόλλησης στον άξονα 6 και το καρούλι του ηλεκτροδίου.

Η διατήρηση σταθερής ταχύτητας πυρσού συγκόλλησης, παρέχει τη δυνατότητα να «κατανεμηθεί» με ισόποσο τρόπο η ενέργεια που προσδίδεται στη συγκόλληση, σε όλο το μήκος αυτής. Η διατήρηση σταθερής ενέργειας συγκόλλησης, στα πλαίσια αυτής της διπλωματικής, κρίθηκε απαραίτητη, προκειμένου να εξαχθούν συνολικά συμπεράσματα για την ποιότητα και τα χαρακτηριστικά των συγκολλήσεων. Δεδομένου ότι η μεταλλογραφική παρατήρηση καθώς και η μέτρηση μικροσκληροτήτων καθ' όλο το μήκος των συγκολλήσεων δεν είναι δυνατές, με τη διατήρηση σταθερής ταχύτητας επιτυγχάνονται συγκολλήσεις με ομοιογενή χαρακτηριστικά.

Στον Πίνακα 5.6 φαίνονται τα τεχνικά χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα FA 06E, όπως αυτά λαμβάνονται από τον κατασκευαστή.

Πίνακας 5.6 Τεχνικά Χαρακτηριστικά του ρομποτικού βραχίονα FA 06E.

FA 06E		
Degrees of Freedom		6 Axis
Maximum Reach		1500 mm
Maximum Payload		6 kg
Maximum Speed	JT1	200 °/s
	JT2	140 °/s
	JT3	200 °/s
	JT4	360 °/s
	JT5	360 °/s
	JT6	600 °/s
Repeatability		0.1 mm +/-
Mass		170 kg
Max. Linear Speed		9200 mm/s
Installation		Floor / Ceiling
Ambient Conditions	Temp.	0 - 45 °C
	Humid.	35 - 85%
	Vibr.	<0.5G

5.3 Διεξαγωγή των Συγκολλήσεων.

Όπως αναφέρθηκε στην Παράγραφο 5.2.1, τα ελάσματα του χάλυβα κόπηκαν και προετοιμάστηκαν για τη συγκόλληση. Η διεξαγωγή των συγκολλήσεων έγινε σε τέσσερις διαφορετικές συνθήκες προκειμένου να επιτευχθούν συγκεκριμένες ενέργειες συγκόλλησης. Οι ενέργειες που επιλέχθηκαν προς εφαρμογή ήταν 1.0 kJ/mm, 1.5 kJ/mm, 2.0 kJ/mm, 2.5 kJ/mm. Το σχετικά μεγάλο πάχος των ελασμάτων απαιτεί πολλαπλά πάσα για να συγκολληθούν σωστά τα ελάσματα (multipass welding).

Η επιλογή των τιμών των παραμέτρων της συγκόλλησης έγινε με τέτοιο τρόπο, έτσι ώστε να επιτευχθούν συγκεκριμένες τιμές προσδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους, όπως αναφέρθηκε πριν. Η τιμή της ενέργειας που προσδίδεται δίνεται από την Εξίσωση (2).

$$\text{Heat Input} = Q = k \cdot \frac{V \cdot I}{s} \quad (2)$$

Όπου:

- Heat Input (H.I.), Q το ποσό της προσδιδόμενης ενέργειας ανά μονάδα μήκους
- V η τάση της μηχανής συγκόλλησης
- I η ένταση του ηλεκτρικού ρεύματος
- s η ταχύτητα κίνησης του πυρσού συγκόλλησης
- k συντελεστής που εξαρτάται από τη μέθοδο συγκόλλησης. Για τη μέθοδο MCAW, k=0.8, [1]



Εικόνα 5.9 Τοποθετημένα ελάσματα, έτοιμα προς συγκόλληση.

Τα δοκίμια τοποθετήθηκαν στο μεταλλικό πάγκο που βρίσκεται δίπλα στο ρομποτικό βραχίονα και στερεώθηκαν έτσι ώστε να διασφαλίζεται αγωγή επαφή (με μεταλλικούς τάκους) με αυτόν. Σημειώνεται ότι ο ακροδέκτης που κλείνει το κύκλωμα είναι συνδεδεμένος στον μεταλλικό πάγκο έτσι ώστε το ηλεκτρικό κύκλωμα που απαιτείται για την έναρξη της συγκόλλησης να είναι μόνιμα κλειστό.

Οι Πίνακες 5.7-5.10 παρουσιάζουν τις παραμέτρους συγκόλλησης που επιλέχθηκαν για κάθε πάσο, σε κάθε ένα από τα προς συγκόλληση ελάσματα καθώς και ο αριθμός των πάσων που εκτιμήθηκε ότι θα διεξαχθούν [2]. Αναφέρεται επίσης ο ρυθμός παροχής ηλεκτροδίου και η παροχή το αερίου προστασίας.

Πίνακας 5.7 Παράμετροι συγκόλλησης Δοκιμίου 1, Heat Input = 1 kJ/mm.

Specimen 1				
<i>Heat Input (H.I.) = 1.0 kJ/mm</i>				
A/A	I [A]	V [Volts]	S [cm/min]	H.I. [kJ/mm]
Bead 1	261	28.5	25	1.5*
Bead 2	261	28.5	37	1.0
Bead 3	261	28.5	37	1.0
Bead 4	261	28.5	37	1.0
Bead 5	261	28.5	37	1.0
Bead 6	261	28.5	37	1.0
Bead 7	261	28.5	37	1.0
Wire Feed Rate [m/min]			8.4	
Gas Flow Rate [lt/min]			19.0	

Πίνακας 5.8 Παράμετροι συγκόλλησης Δοκιμίου 2, Heat Input = 1.5 kJ/mm.

Specimen 2				
<i>Heat Input (H.I.) = 1.5 kJ/mm</i>				
A/A	I [A]	V [Volts]	S [cm/min]	H.I. [kJ/mm]
Bead 1	280	28.7	26	1.5
Bead 2	280	28.7	26	1.5
Bead 3	280	28.7	26	1.5
Bead 4	280	28.7	26	1.5
Bead 5	280	28.7	26	1.5
Wire Feed Rate [m/min]			8.9	
Gas Flow Rate [lt/min]			19.0	

Πίνακας 5.9 Παράμετροι συγκόλλησης Δοκιμίου 3, Heat Input = 2.0 kJ/mm.

Specimen 3				
<i>Heat Input (H.I.) = 2.0 kJ/mm</i>				
A/A	I [A]	V [Volts]	S [cm/min]	H.I. [kJ/mm]
Bead 1	295	28.7	20	2.0
Bead 2	295	28.7	20	2.0
Bead 3	295	28.7	20	2.0
Bead 4	295	28.7	20	2.0
Wire Feed Rate [m/min]			8.9	
Gas Flow Rate [lt/min]			19.0	

Πίνακας 5.10 Παράμετροι συγκόλλησης Δοκιμίου 4, Heat Input = 2.5 kJ/mm.

Specimen 4				
<i>Heat Input (H.I.) = 2.5 kJ/mm</i>				
A/A	I [A]	V [Volts]	S [cm/min]	H.I. [kJ/mm]
Bead 1	310	31.7	20	2.5
Bead 2	310	31.7	20	2.5
Bead 3	310	31.7	20	2.5
Wire Feed Rate [m/min]			11.4	
Gas Flow Rate [lt/min]			19.0	

Η τιμή της ενέργειας ανά μονάδα μήκους στο πρώτο πάσο του Δοκιμίου 1 είναι μεγαλύτερη από 1 kJ/mm, ενώ στα υπόλοιπα διατηρήθηκε στην προκαθορισμένη τιμή. Επιλέχτηκε η τιμή H.I = 1.5 kJ/mm έτσι ώστε να παρέχεται επαρκής ενέργεια προκειμένου το πάσο της ρίζας να διεξαχθεί σωστά και χωρίς σφάλματα όπως ατελής τήξη ή εκτοξεύσεις. Επίσης η αυξημένη ενέργεια εξασφάλισε την πλήρη επικάλυψη του διάκενου των 5 mm.



Εικόνα 5.10 Πάσο ρίζας στο Δοκίμιο 4, H.I = 2.5 kJ/mm.

Μετά τον καθορισμό των παραμέτρων που φαίνονται στους πίνακες παραπάνω, πραγματοποιήθηκαν οι συγκολλήσεις των δοκιμίων.

Πρέπει να σημειωθεί ότι μετά από κάθε πάσο, σε όλες τις συγκολλήσεις, υπήρχε ένα χρονικό διάστημα αναμονής μέχρι να διεξαχθεί το επόμενο. Η διαδικασία αυτή γίνεται για να υπάρχει αρκετός χρόνος απόψυξης του εναποτιθέμενου πάσου κάτω από τους 250 °C. Η μέτρηση των θερμοκρασιών γινόταν με τη χρήση θερμόμετρου laser.



Εικόνα 5.11 Μέτρηση της θερμοκρασία μετά από κάθε πάσο, με τη χρήση θερμόμετρου laser.

Όπως αναφέρθηκε στην αρχή του εδαφίου, οι συγκολλήσεις που διεξάγονται στα πλαίσια της διπλωματικής, είναι συγκολλήσεις πολλαπλών πάσων (multipass welding). Αυτό σημαίνει ότι τα ελάσματα του χάλυβα δέχονται μεγάλα, επαναλαμβανόμενα θερμικά φορτία. Τα δοκίμια του χάλυβα δεχόμενα αυτά τα φορτία, διαστέλλονταν και συστέλλονταν μετά από κάθε πάσο με αποτέλεσμα να αποκτήσουν μόνιμη γωνιακή παραμόρφωση. Η πιθανή πάκτωση των δοκιμίων θα μπορούσε να αποτρέψει τη δημιουργία σχετικής γωνίας στα ελάσματα, αλλά όπως έχει εξηγηθεί στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μια τέτοια διαδικασία θα οδηγούσε στην υπέρθεση των παραμενουσών τάσεων στα δοκίμια. Μια τέτοια διαδικασία θα καθιστούσε πολύ δύσκολη των εξαγωγή συμπερασμάτων για τις παραμένουσες τάσεις που εισάγονται στα δοκίμια, αποκλειστικά λόγω των θερμικών φορτίων που δέχονται από τη συγκόλληση. Η μέτρηση των παραμένουσων τάσεων στα δοκίμια θα παρουσιαστεί σε επόμενο εδάφιο. Ο Πίνακας 5.11 παρουσιάζει τη γωνιακή παραμόρφωση των δοκιμίων σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια και τον αριθμό των πάσων που έγινε σε κάθε δοκίμιο [2].

Πίνακας 5.11 Γωνιακή παραμόρφωση δοκιμίων μετά το πέρας των συγκολλήσεων.

Specimen	1	2	3	4
H.I.	1.0 kJ/mm	1.5 kJ/mm	2.0 kJ/mm	2.5 kJ/mm
No of Beads	7	5	4	3
Γωνία	9.3°	3.5°	5.4°	3.1



Εικόνα 5.12 Το Δοκίμιο 1 μετά το τέλος της συγκόλλησης (7 πάσα). Διακρίνεται η γωνιακή παραμόρφωση που έχει δημιουργηθεί.



Εικόνα 5.13 Η όψη της ρίζας της συγκόλλησης στο κάτω μέρος των ελασμάτων.

5.4 Μέτρηση Παραμενουσών Τάσεων.

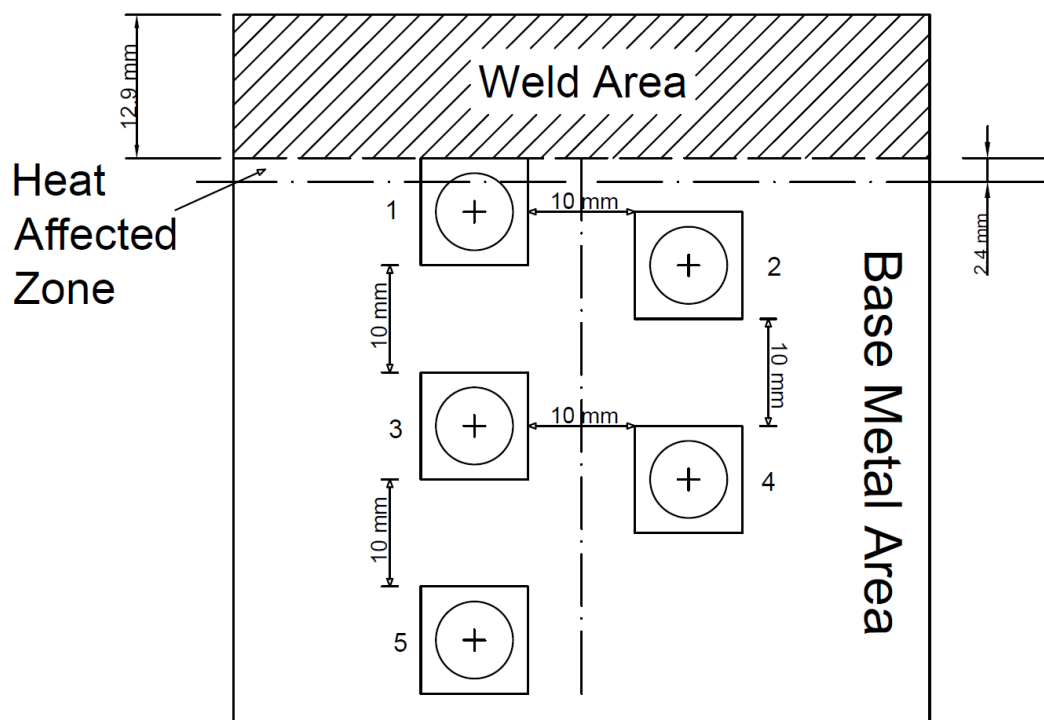
Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 της παρούσας διπλωματικής εργασίας, η δημιουργία παραμενουσών τάσεων σε μια συγκόλληση, είναι μια διαδικασία που εξαρτάται από πολλές παραμέτρους και είναι αναπόφευκτη. Η δυνατότητα αξιολόγησης του μεγέθους των παραμενουσών τάσεων σε μια συγκολλητή κατασκευή, έχει μεγάλη σημασία για τον καθορισμό των συνθηκών λειτουργίας της αλλά και για τη διάρκεια ζωής της.

5.4.1 Προετοιμασία της επιφάνειας – Τοποθέτηση ροζετών

Η διαδικασία μέτρησης παραμενουσών τάσεων ξεκινά με την κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειας των συγκολλήσεων για να κολληθούν οι ροζέτες μέτρησης των παραμορφώσεων. Η επιφάνεια του δοκιμίου υφίσταται τοπικό καθαρισμό στην περιοχή που θα μετρηθούν οι παραμένουσες τάσεις.

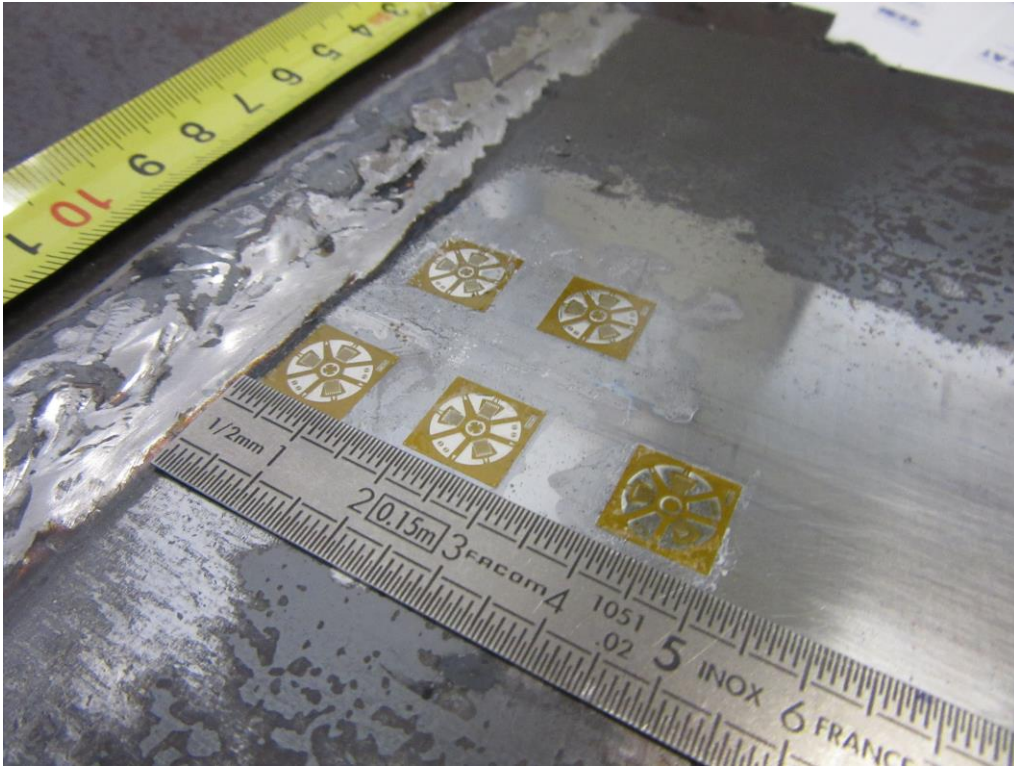
Η λείανση της επιφάνειας έγινε με τη χρήση της λειαντικής συσκευής χειρός Transpol-2 της εταιρίας Struers που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Χρησιμοποιήθηκαν λειαντικά χαρτιά κοκκομετρίας P# 80 – 320. Ο σκοπός του καθαρισμού της επιφάνειας του δοκιμίου, είναι αφενός η απομάκρυνση του αντιδιαβρωτικού βερνικιού που φέρουν τα ελάσματα των δοκιμίων όπως διατίθενται από τον κατασκευαστή και τυχόν ελαίων και ακαθαρσιών που μπορεί να υπάρχουν, προκειμένου να μπορεί να συγκρατηθεί η ροζέτα μέτρησης μέσω της κόλλας, και αφετέρου η δημιουργία μιας αρκετά λείας επιφάνειας έτσι ώστε να εξασφαλίζεται απόλυτη επαφή της ροζέτας με την επιφάνεια του προς μέτρηση δοκιμίου.

Μετά τη λείανση της επιφάνειας έγινε η τοποθέτηση των ροζετών σύμφωνα με το παρακάτω σχεδιάγραμμα (Εικ. 5.15).

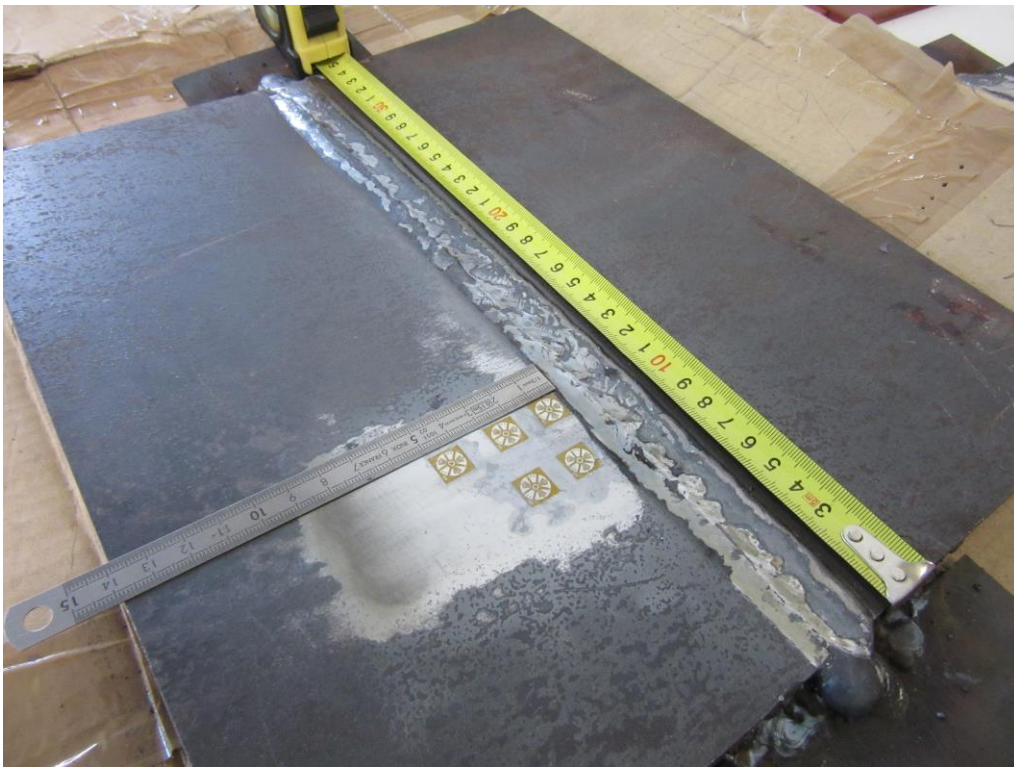


Εικόνα 5.14 Σκαρίφημα τοποθέτησης ροζετών στο δοκίμιο συγκόλλησης.

Αρχικά, η λειασμένη επιφάνεια καθαρίστηκε με χρήση ακετόνης έτσι ώστε να απομακρυνθούν οι ακαθαρσίες που ενδέχεται να υπάρχουν. Έπειτα, με χρήση ισχυρής κόλλας τοποθετήθηκαν οι πέντε ροζέτες. Η τοποθέτηση των ροζετών φαίνεται ολοκληρωμένη στις εικόνες που ακολουθούν (Εικ. 5.15-5.16).



Εικόνα 5.15 Οι τοποθετημένες ροζέτες πάνω στο προς μέτρηση δοκίμιο.

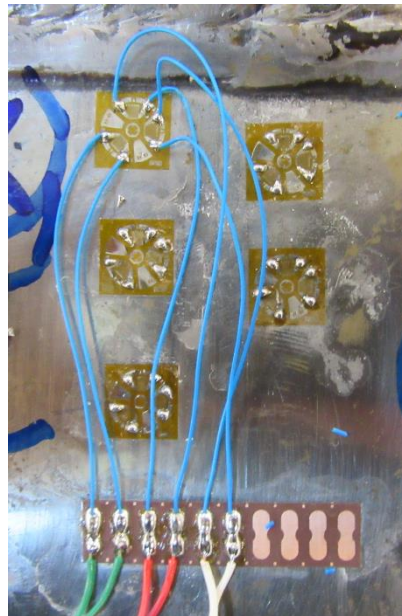


Εικόνα 5.16 Διακρίνεται η περιοχή που επιλέχτηκε για τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων.

Η τοποθέτηση της κάθε ροζέτας πρέπει να γίνεται με προσοχή έτσι ώστε τα δύο κάθετα επιμηκυνσιόμετρα της ροζέτας να ταυτίζονται με τους κύριους άξονες της συγκόλλησης (άξονας κατά τη διεύθυνση της συγκόλλησης και άξονας κάθετος στη διεύθυνση της συγκόλλησης). Από την Εικόνα 5.16 φαίνεται ότι οι κάθετοι ακροδέκτες της κάθε ροζέτας έχουν τοποθετηθεί σωστά.

Οι ροζέτες που χρησιμοποιήθηκαν είναι τύπου EA-XX-062RE-120 (εν συντομία τύπου «RE») της εταιρίας Micro – Measurements.

Η σύνδεση των ροζετών με τη μετρητική διάταξη καταγραφής των παραμορφώσεων, απαιτεί την παρεμβολή χάλκινων ακροδεκτών και τη σύνδεση των ακροδεκτών των επιμηκυνσιόμετρων της ροζέτας με αυτούς, όπως φαίνεται στην Εικόνα 5.17.



Εικόνα 5.17 Σύνδεση των ακροδεκτών της ροζέτας με το χάλκινο ακροδέκτη.

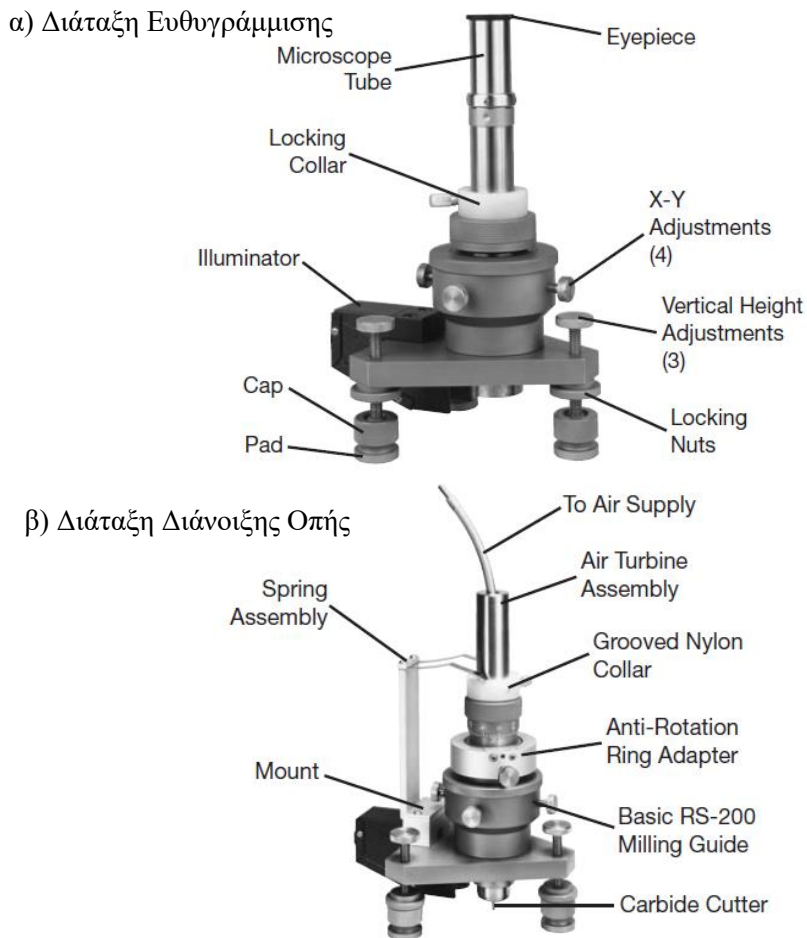
Το όργανο από το οποίο λαμβάνονται οι μετρήσεις των παραμορφώσεων κατά τη διαδικασία διάνοιξης οπής, είναι ο μετατροπέας αναλογικών σε ψηφιακά σήματα Spider 8 της εταιρίας Hottinger Baldwin Messtechnik που διαθέτει το Ε.Ν.Τ. (Εικ. 5.18). Η αναγωγή των ηλεκτρικών σημάτων που λαμβάνει το μετρητικό όργανο σε παραμορφώσεις, γίνεται με τη βοήθεια του λογισμικού CATMAN AP.



Εικόνα 5.18 Το μετρητικό όργανο Spider 8, του Ε.Ν.Τ.

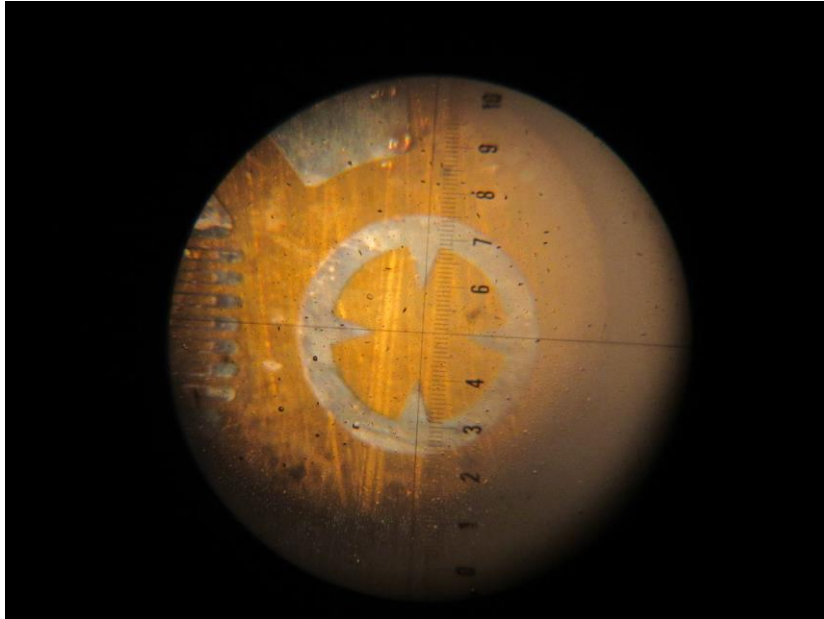
5.4.2 Διάταξη διάνοιξης οπής.

Οι παραμένουσες τάσεις στις συγκολλήσεις που πραγματοποιηθήκαν στα πλαίσιο της παρούσας διπλωματικής εργασίας, μετρήθηκαν όπως έχει αναφερθεί, με τη μέθοδο της τυφλής οπής. Η διατρητική διάταξη που χρησιμοποιήθηκε είναι το μοντέλο RS-200 Milling Guide της εταιρίας VISHAY, που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Τα εξαρτήματα που απαρτίζουν τη διάταξη διάνοιξης οπής φαίνονται στην εικόνα που ακολουθεί (Εικ 5.19).



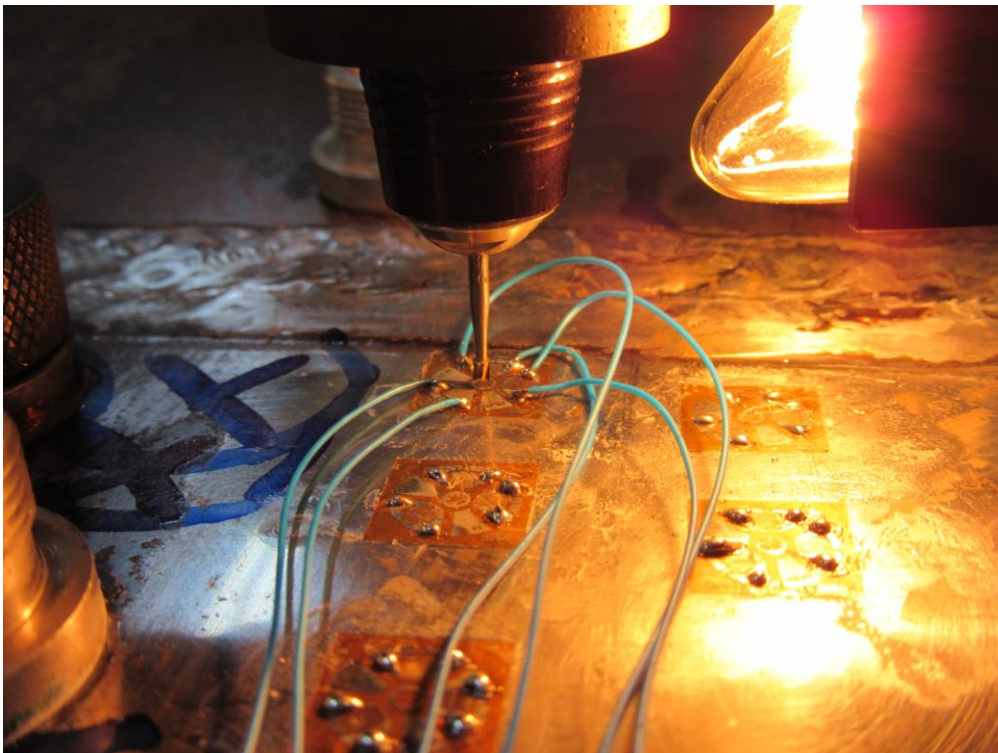
Εικόνα 5.19 α) Η χρήση της διάταξης για την ευθυγράμμιση με το κέντρο της ροζέτας. β) Η διάταξη διάνοιξης οπής στο κέντρο της ροζέτας.

Η διάταξη διάνοιξης οπής πρέπει να ευθυγραμμιστεί με το κέντρο της ροζέτας. Για τη σωστή ευθυγράμμιση της διάταξης αρχικά έγινε οπτική ευθυγράμμιση της διάταξης με την κάθε μετρούμενη ροζέτα, στη συνέχεια τα πέλματα της διάταξης κολλήθηκαν στις κατάλληλες θέσεις και έπειτα με τη χρήση του μικροσκοπίου και των ρυθμιστών X – Y που φαίνονται στο προηγούμενο σχήμα έγινε η απόλυτη ευθυγράμμιση της διατρητικής διάταξης με το κέντρο της ροζέτας. Το αποτέλεσμα της ευθυγράμμισης φαίνεται στην Εικόνα 5.20 που ακολουθεί.

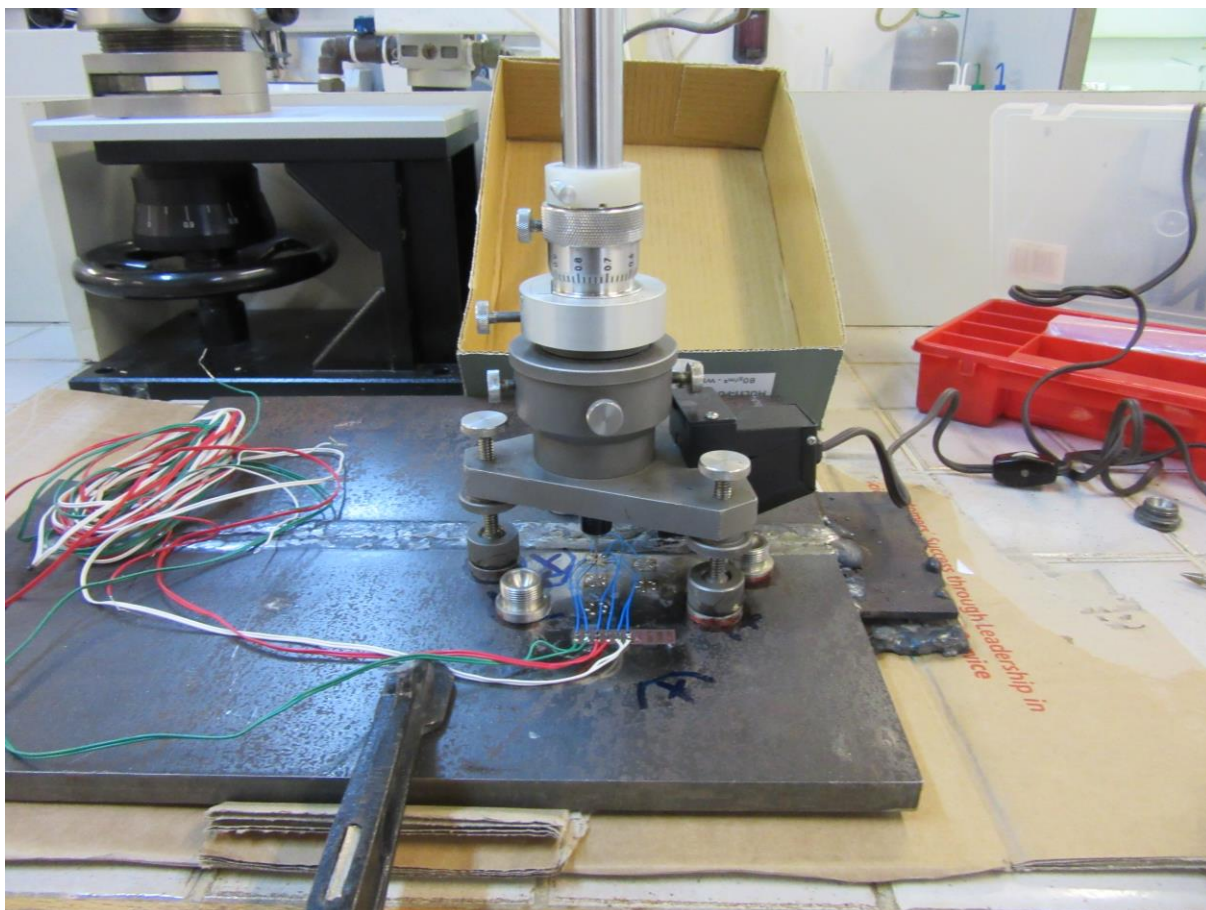


Εικόνα 5.20 Ευθυγράμμιση της διατρητικής διάταξης με το γεωμετρικό κέντρο της ροζέτας με τη χρήση του μικροσκοπίου.

Μετά την ευθυγράμμιση της διάταξης με το κέντρο της ροζέτας, το μικροσκόπιο αφαιρείται και στη θέση του εισέρχεται η τουρμπίνα διάτρησης που λειτουργεί με τη χρήση πεπιεσμένου αέρα. Η τουρμπίνα διάτρησης πιέζεται προς τη διεύθυνση της οπής μέσω ειδικού ελατηρίου και η κάθετη κίνησή της ελέγχεται μέσω βερνιέρου που έχει εύρος 0 – 2mm (Εικ 5.21-5.22).



Εικόνα 5.21 Η ευθυγράμμιση του κονδυλιού διάνοιξης οπής που φέρει η τουρπίνα.



Εικόνα 5.22 Η διάταξη διάνοιξης οπής έτοιμη προς χρήση.

5.4.3 Παράθεση των αποτελεσμάτων των μετρήσεων.

Η διαδικασία που αναφέρεται παραπάνω έγινε αρχικά το για το Δοκίμιο 2 με $H.I = 1.5$ KJ/mm. Η επιλογή του δοκιμίου αυτού έγινε διότι προηγούμενες μελέτες που έχουν διεξαχθεί στο Ε.Ν.Τ. περιλαμβάνουν μετρήσεις που αφορούν την ενέργεια 1.0 KJ/mm σε συγκολλήσεις του χάλυβα AH 40-FCA με τη μέθοδο MCAW. Η μέτρηση των παραμορφώσεων έγινε σε βηματικά αυξανόμενο βάθος έως 2mm με βήμα 0.2mm.

Μετά τη λήψη των μετρήσεων των παραμορφώσεων (ϵ_i) έγιναν όλοι οι απαραίτητοι υπολογισμοί προκειμένου να εξαχθούν τα αποτελέσματα για τις τάσεις που αναφέρονται στο κύριο σύστημα αναφοράς $\sigma_{max}, \sigma_{min}$, καθώς και η γωνία α σε σχέση με το επιμηκυνσιόμετρο 1 της κάθε ροζέτας. Όπως έχει αναφερθεί στο Κεφάλαιο 2 στο κύριο σύστημα αναφοράς απουσιάζει η ύπαρξη διατμητικής τάσης, όμως κατά την περιστροφή αυτού του τασικού πεδίου για να ταυτιστεί με του κύριους άξονες της συγκόλλησης, προκύπτει διατμητική τάση. Οι εξισώσεις με βάση τις οποίες έγινε η περιστροφή των τάσεων που υπολογίζονται βάσει της θεωρίας του Κεφαλαίου 2 είναι οι παρακάτω:

$$\sigma'_x = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} + \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\alpha + \tau_{xy} \cdot \sin 2\alpha \quad (i)$$

$$\sigma'_y = \frac{\sigma_x + \sigma_y}{2} - \frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \cos 2\alpha - \tau_{xy} \cdot \sin 2\alpha \quad (ii)$$

$$\tau'_{xy} = -\frac{\sigma_x - \sigma_y}{2} \cdot \sin 2a + \tau_{xy} \cdot \cos 2a \quad (iii)$$

Για τον υπολογισμό των κύριων παραμενουσών τάσεων πρέπει να καθοριστούν οι συντελεστές \bar{A}, \bar{B} , όπως έχει αναφερθεί στο θεωρητικό μέρος της διπλωματικής εργασίας. Ο υπολογισμός αυτών των συντελεστών γίνεται επιλύοντας ως προς αυτούς τις εξισώσεις 13.α και 13.β του Κεφαλαίου 2. Οι συντελεστές \bar{a}, \bar{b} , υπολογίστηκαν με βάση το νομογράφημα που παρέχεται από τον κατασκευαστή των ροζετών, για ροζέτες τύπου «RE».

Για τον υπολογισμό των \bar{A}, \bar{B} , είναι απαραίτητο να προσδιοριστεί το μέτρο ελαστικότητας E , και ο λόγος του Poisson για το υλικό. Σημειώνεται ότι για τους χάλυβες δίνεται ότι:

$$E = 200 \text{ GPa} \text{ και}$$

$$\nu = 0.3$$

Επίσης είναι απαραίτητος ο υπολογισμός του λόγου D_o/D , όπου D_o είναι η διάμετρος της οπής που ανοίχτηκε και D η διάμετρος του κύκλου που περιγράφει τα κέντρα των επιμηκυνσιόμετρων της ροζέτας και έχει κέντρο το γεωμετρικό κέντρο της ροζέτας. Έτσι:

$$D_o = 1.7 \text{ mm} \text{ (υπολογίστηκε ελαφρά μεγαλύτερη από τη διάμετρο του κονδυλιού)}$$

$$D = 5.13 \text{ mm, σύμφωνα με τον κατασκευαστή}$$

$$\text{Επομένως λαμβάνεται ότι } D_o/D = 0.33.$$

Για τις τιμές των παραπάνω μεγεθών οι συντελεστές \bar{a}, \bar{b} λαμβάνονται ως εξής

$$\bar{a} = 0.115$$

$$\bar{b} = 0.327$$

Επομένως οι τιμές των συντελεστών \bar{A}, \bar{B} , υπολογίζονται ως εξής:

$$\bar{A} = -3.7375 \cdot 10^{-11}$$

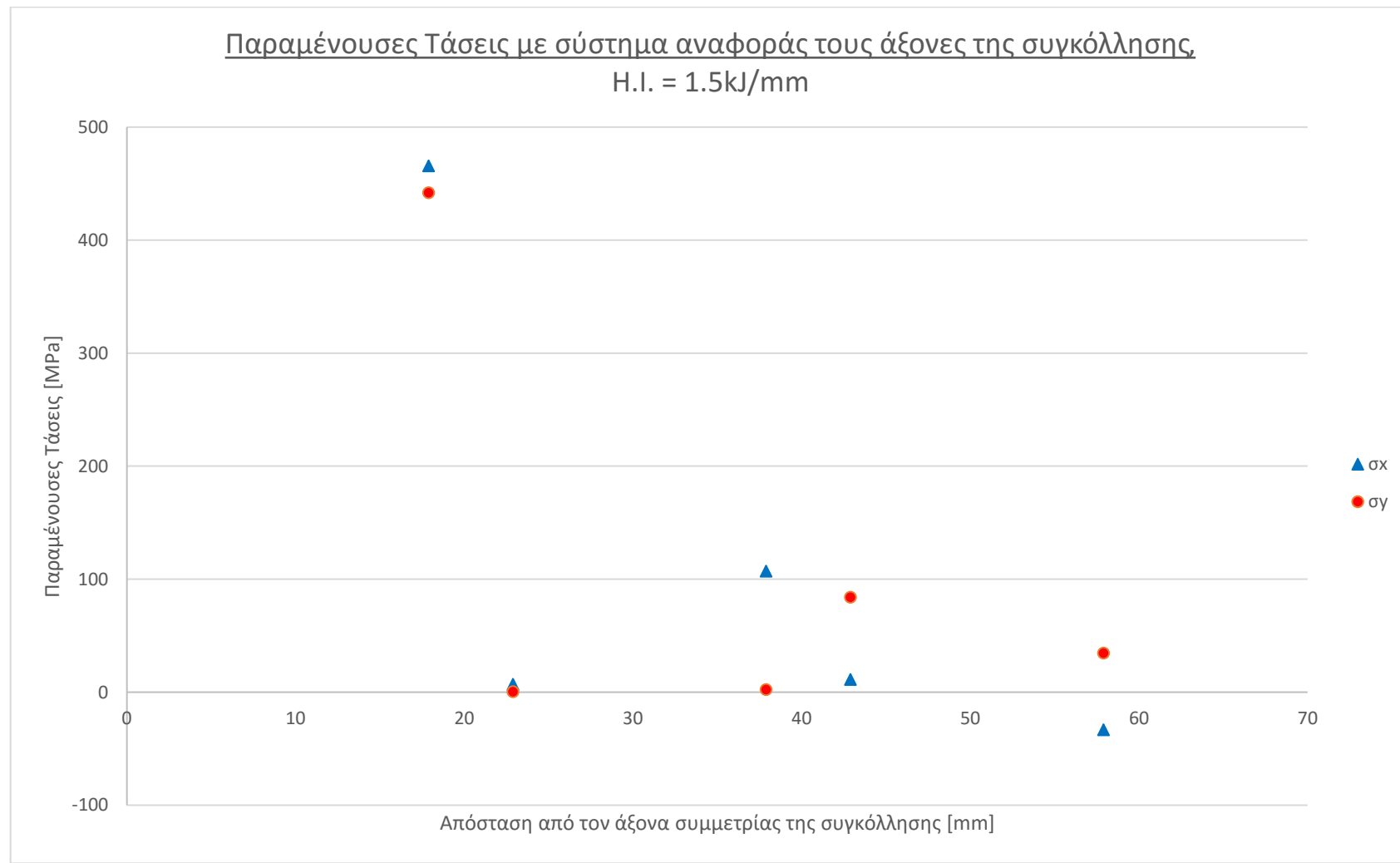
$$\bar{B} = -8.1750 \cdot 10^{-11}$$

Στον Πίνακα 5.12 που φαίνεται στην επόμενη σελίδα παρουσιάζονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών των κύριων παραμενουσών τάσεων για όλες τις ροζέτες.

Το Διάγραμμα 5.1 απεικονίζει την κατανομή των παραμενουσών τάσεων κατά το διαμήκη (σ_x) και τον εγκάρσιο άξονα της συγκόλλησης (σ_y).

Πίνακας 5.12 Υπολογισμός παραμενουσών τάσεων για τις ροζέτες 1-5.

A/A Ροζέτας	ε at 2mm		$\varepsilon_3 + \varepsilon_1$	$\varepsilon_3 - \varepsilon_1$	$\varepsilon_3 + \varepsilon_1 - 2\varepsilon_2$	$\tan 2a$	a°	σ_{\max}	σ_{\min}
1	ε_1	6.462	-678.461	-691.385	56.309	-0.08144	-2.33	665.953	241.687
	ε_2	-367.385							
	ε_3	-684.923							
2	ε_1	120.923	-5.539	-247.385	-92.309	0.373139	10.23	84.453	-77.043
	ε_2	43.385							
	ε_3	-126.462							
3	ε_1	-73.846	-108.000	39.692	-128.308	-3.23259	-36.41	113.313	31.168
	ε_2	10.154							
	ε_3	-34.154							
4	ε_1	-131.077	-71.077	191.077	-28.615	-0.14976	-4.26	106.628	-11.542
	ε_2	-21.231							
	ε_3	60.000							
5	ε_1	-64.615	-0.923	128.307	-85.847	-0.66907	-16.89	47.828	-46.593
	ε_2	42.462							
	ε_3	63.692							



Διάγραμμα 5.1 Παραμένουσες Τάσεις ως προς τη διεύθυνση των αξόνων της συγκόλλησης.

Η μέτρηση των παραμενουσών τάσεων αποδείχτηκε ιδιαίτερα προβληματική. Η διαδικασία της διάτρησης χρειάστηκε να επαναληφθεί τρεις φορές στην περίπτωση της πρώτης ροζέτας διότι παρατηρούνταν εκτεταμένη φθορά στο κονδύλι. Οι μετρήσεις που παρουσιάζονται στο Διάγραμμα 5.1, για την περίπτωση της ροζέτας 1 αφορούν στην τρίτη προσπάθεια μέτρησης όπου αντικαταστάθηκε το κονδύλι με επικάλυψη νιτριδίου του τιτανίου με κονδύλι καρβιδίου του βολφραμίου.

Η μέτρηση που λήφθηκε από την ροζέτα 1 δείχνει ότι οι παραμένουσες τάσεις στην περιοχή ξεπερνούν το όριο διαρροής του υλικού και έτσι δεν μπορεί να γίνει αποδεκτή. Σύμφωνα με το πρότυπο που χρησιμοποιήθηκε, η μέθοδος της τυφλής οπής μπορεί να μην αποδίδει σωστά αποτελέσματα στην περίπτωση υπαρχόντων συσσωρευμένων τάσεων στα δοκίμια. Επίσης μια ακόμα πιθανή εξήγηση των μη αποδεκτών μετρήσεων, είναι η πιθανότητα εργοσκλήρυνσης του χάλυβα τοπικά λόγω των υψηλών στρεφών στις οποίες περιστρέφεται το κονδύλι.

Οι μετρήσεις που λήφθηκαν από τις υπόλοιπες ροζέτες κυμαίνονται σε φυσιολογικά επίπεδα όσον αφορά τις συγκολλήσεις χαλύβων υψηλής αντοχής και η κατανομή τους αποδίδεται όπως ορίζει το πρότυπο. Οι κρίσιμες τιμές, όμως, των παραμενουσών τάσεων αναπτύσσονται στις περιοχές κοντά στον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης επομένως δεν είναι δυνατή η εξαγωγή συμπερασμάτων ως προς την κατανομή των τάσεων στη συγκόλληση.

5.5 Μακροσκοπική Παρατήρηση.

Μετά τη μέτρηση των παραμενουσών τάσεων, ετοιμάστηκαν δοκίμια κατάλληλων διαστάσεων, κάθετα στη διεύθυνση της συγκόλλησης, τα οποία κόπηκαν στο δισκοτόμο τύπου Discotom 50 της εταιρίας Struers, που διαθέτει το Μηχανουργείο του Εργαστηρίου Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Για τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων απαιτείται κατάλληλη προετοιμασία της επιφάνειάς τους. Τα βήματα της διαδικασίας της προετοιμασίας περιγράφονται συνοπτικά παρακάτω.

Λείανση

Η λείανση των δοκιμίων έγινε με τη χρήση της λειαντικής μηχανής LaboPol – 5, περιστρεφόμενου πλατό, που διαθέτει το Ε.Ν.Τ. Για τη σωστή λείανση των δοκιμίων, απαιτείται η χρήση λειαντικών χαρτιών SiC αυξανόμενης κοκκομετρίας, που τοποθετούνται στο περιστρεφόμενο πλατό της μηχανής λείανσης. Η επιφάνεια των δοκιμίων μετά την κοπή τους στο δισκοτόμο απαιτεί την έναρξη της λείανσης με χαρτί τραχύτητας P# 500. Στη συνέχεια χρησιμοποιήθηκε η εξής ακολουθία λειαντικών χαρτιών: P# 800, 1000, 1200, 2000, 4000. Ο κατασκευαστής των χαρτιών προτείνει ενδεικτικά τη λείανση της επιφάνειας για 3 – 5 λεπτά. Έτσι τα δοκίμια λειάνθηκαν για 3 λεπτά σε κάθε τραχύτητα.

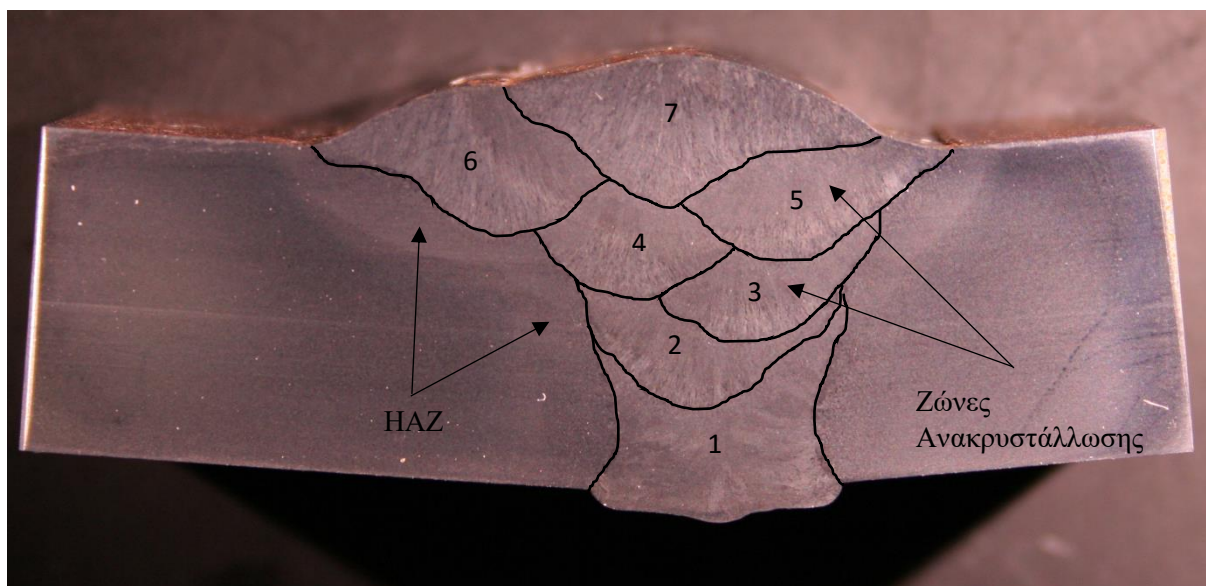
Στίλβωση

Μετά το πέρας της λείανσης των δοκιμίων, απαιτείται η στίλβωσή του προκειμένου να εξαλειφθούν οι λειαντικές γραμμές που προκύπτουν από τη διαδικασία της λείανσης και το δοκίμιο να αποκτήσει όψη καθρέπτη. Για τη στίλβωση των δοκιμίων, τοποθετείται στο περιστρεφόμενο πλατό της λειαντικής μηχανής, δίσκος με επιφάνεια βελούδου και πάνω σε αυτόν πάστα αλούμινας (οξειδίο του αλουμινίου – Al_2O_3) με κοκκομετρία $1\mu m$ και $0.1\mu m$. Η διαδικασία της στίλβωσης απαιτεί σχετικά χαμηλές στροφές μηχανής (περίπου 200 rpm) και ο χρόνος που εκτίθεται κάθε δοκίμιο σε κάθε μία κοκκομετρία είναι και σε αυτήν την περίπτωση 3 λεπτά.

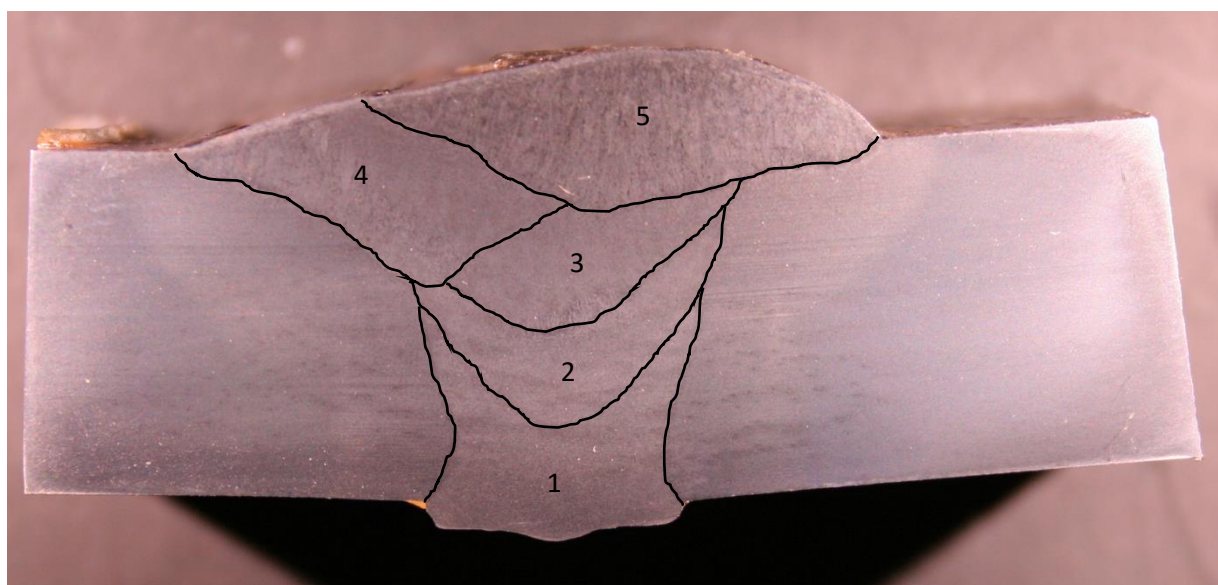
Χημική Προσβολή

Μετά τη λείανση και τη στίλβωση των δοκιμίων, οπότε έχουν πλέον αποκτήσει λεία και επίπεδη επιφάνεια, απαιτείται η χημική προσβολή τους προκειμένου να αναδειχθεί η μικροδομή του μετάλλου και του προφίλ της συγκόλλησης. Το χημικό αντιδραστήριο που χρησιμοποιήθηκε για τη χημική προσβολή των δοκιμίων είναι το διάλυμα Nital 2% το οποίο αποτελείται από 2 ml Νιτρικό Οξύ (HNO_3) και 98 ml καθαρή Αιθανόλη (C_2H_6O). Κατά τη διάρκεια της χημικής προσβολής υπάρχει κίνδυνος να προσβληθεί περισσότερο από ό,τι πρέπει η προετοιμασμένη επιφάνεια με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η στερεοσκοπική ή μικροσκοπική της παρατήρηση. Η περίπτωση να συμβεί αυτό είναι συνάρτηση της δραστηριότητας του διαλύματος και του χρόνου που εκτίθεται η επιφάνεια του δοκιμίου σε αυτό. Τα δοκίμια στη συγκεκριμένη διαδικασία εκτέθηκαν στο διάλυμα του Nital 2% για περίπου 10 δευτερόλεπτα και έπειτα η επιφάνεια ξεπλύθηκε με καθαρή αιθανόλη και στεγνώθηκε με τη βοήθεια πιστολιού θερμού αέρα.

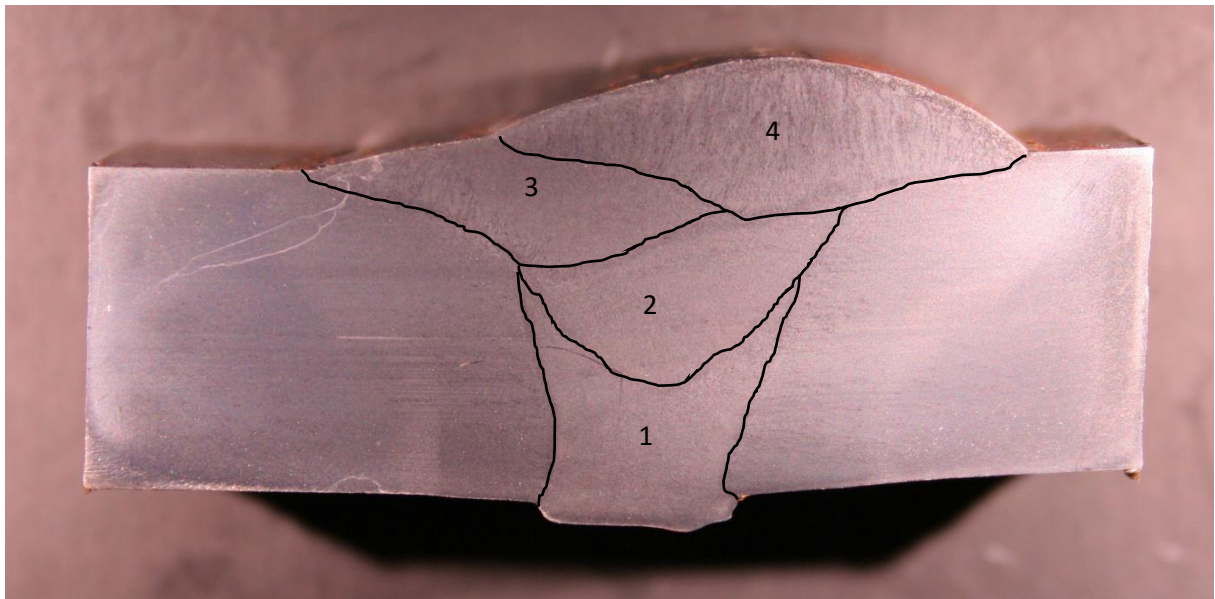
Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται οι στερεοσκοπικές φωτογραφίες που τραβήχτηκαν με τη βοήθεια ψηφιακής κάμερας υψηλής ανάλυσης.



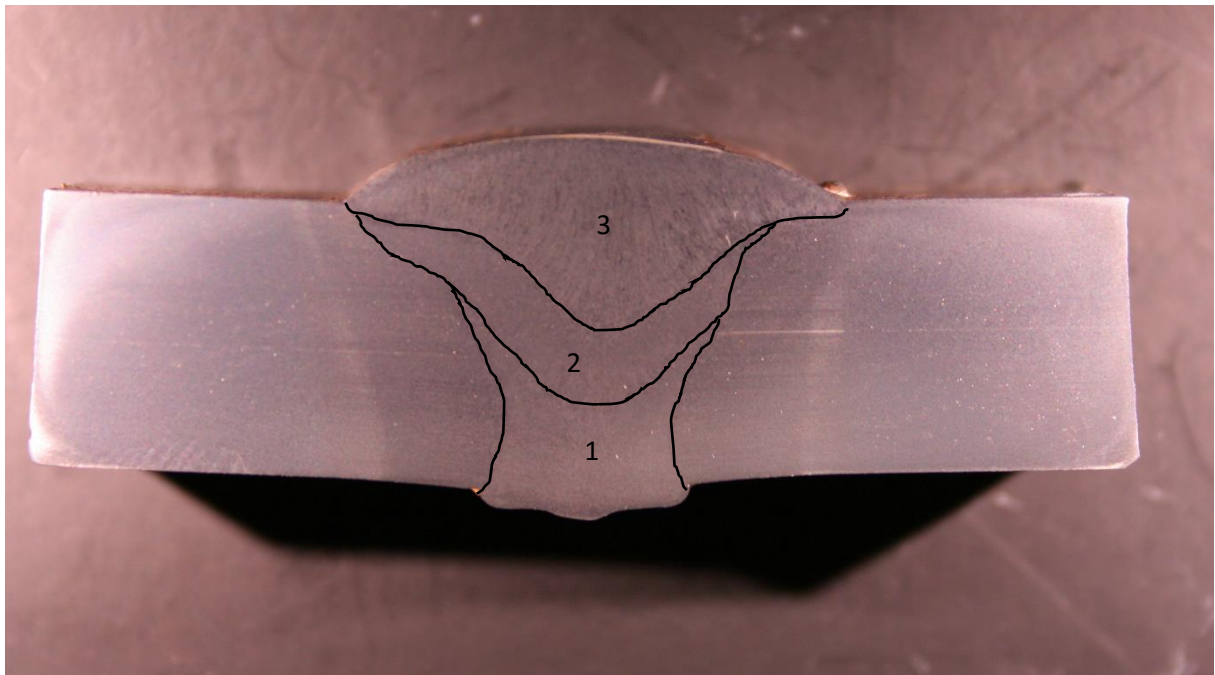
Εικόνα 5.23 Στερεοσκοπική απεικόνιση του Δοκιμίου 1.



Εικόνα 5.24 Στερεοσκοπική απεικόνιση του Δοκιμίου 2.



Εικόνα 5.25 Στερεοσκοπική απεικόνιση του Δοκιμίου 3.



Εικόνα 5.26 Στερεοσκοπική απεικόνιση του Δοκιμίου 4.

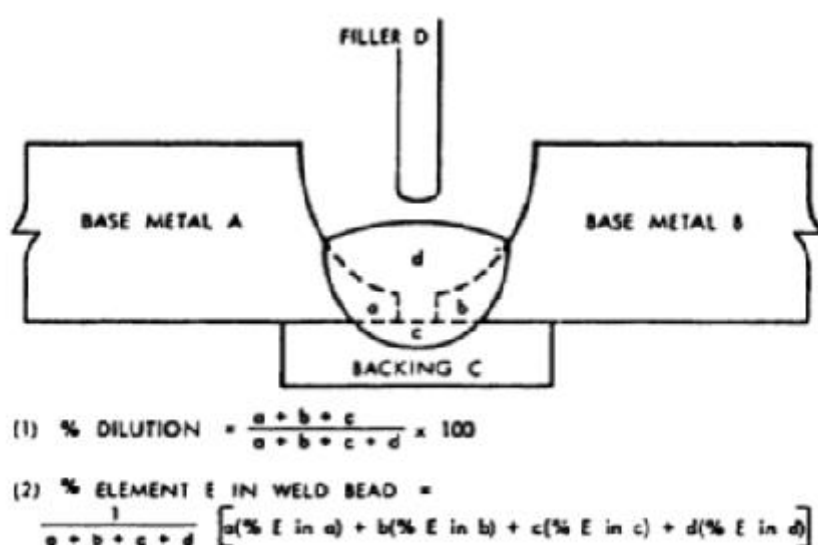
Στις φωτογραφίες που προηγήθηκαν μπορούν να παρατηρηθούν ο αριθμός των πάσων που έγιναν σε κάθε συγκόλληση, η Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη (Heat Affected Zone – HAZ) που έχει η κάθε συγκόλληση, καθώς και οι ανακρυσταλλωμένες περιοχές της ζώνης τήξης.

Κάθε κορδόνι που εισάγεται στη συγκόλληση στερεοποιείται και η μικροδομή του αναπτύσσεται με τη μορφή δενδριτών. Παρόλα αυτά η θερμοκρασία που αναπτύσσεται λόγω της ενέργειας που εισάγεται στη συγκόλληση από το επόμενο πάσο, συμβάλει στην ανόπτηση ή και στην ανακρυστάλλωση του μετάλλου συγκόλλησης που έχει ήδη εναποτεθεί και στερεοποιηθεί.

Στη Εικόνα 5.23 παρατηρείται ότι η χαμηλότερη ενέργεια ανά μονάδα μήκους συγκόλλησης (H.I) οδηγεί στη μερική ανακρυστάλλωση των πάσων που έχουν στερεοποιηθεί, ενώ στις Εικόνες 5.24-5.26 φαίνεται ότι η ενέργεια που εισάχθηκε στη συγκόλληση κατά το πάσο της ενίσχυσης (Cover Pass) έχει συμβάλει στην πλήρη ανακρυστάλλωση του μετάλλου συγκόλλησης στα πάσα που προηγούνται αυτού.

Περεταίρω στερεοσκοπική ανάλυση των δοκιμίων έγινε με τη βοήθεια του στερεοσκοπίου Leica MZ6 της Μονάδας Μεταλλογραφίας του Ε.Ν.Τ.. Το στερεοσκόπιο αυτό διαθέτει ικανότητα βηματικής μεγέθυνσης x0.63, x0.80, x1.0, x1.25, x1.6, x2.0, x2.5, x3.2, x4.0, και μπορεί να δεχτεί ψηφιακή κάμερα που συνδέεται σε Η/Υ. Μέσω της παραπάνω διάταξης και του λογισμικού Image Pro Plus Image Analysis της εταιρίας Leica μετρήθηκε το πλάτος της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης κάθε δοκιμίου.

Επίσης με τη χρήση του λογισμικού που αναφέρθηκε, μετρήθηκε το εμβαδόν της επιφάνειας της ζώνης τήξης, εγκάρσια στη διεύθυνσή της και γνωρίζοντας το εμβαδόν της λοξοτομής μέσω του προτύπου, αλλά και συνυπολογίζοντας τη γωνιακή παραμόρφωση που έχουν δεχτεί τα δοκίμια όπως αναφέρεται στην Παράγραφο 5.3 του πειραματικού μέρους της παρούσας διπλωματικής εργασίας, υπολογίστηκε η τελική αραίωση του μετάλλου βάσης στο μέταλλο συγκόλλησης, αξιοποιώντας τη μεθοδολογία που περιγράφεται στην επόμενη εικόνα.



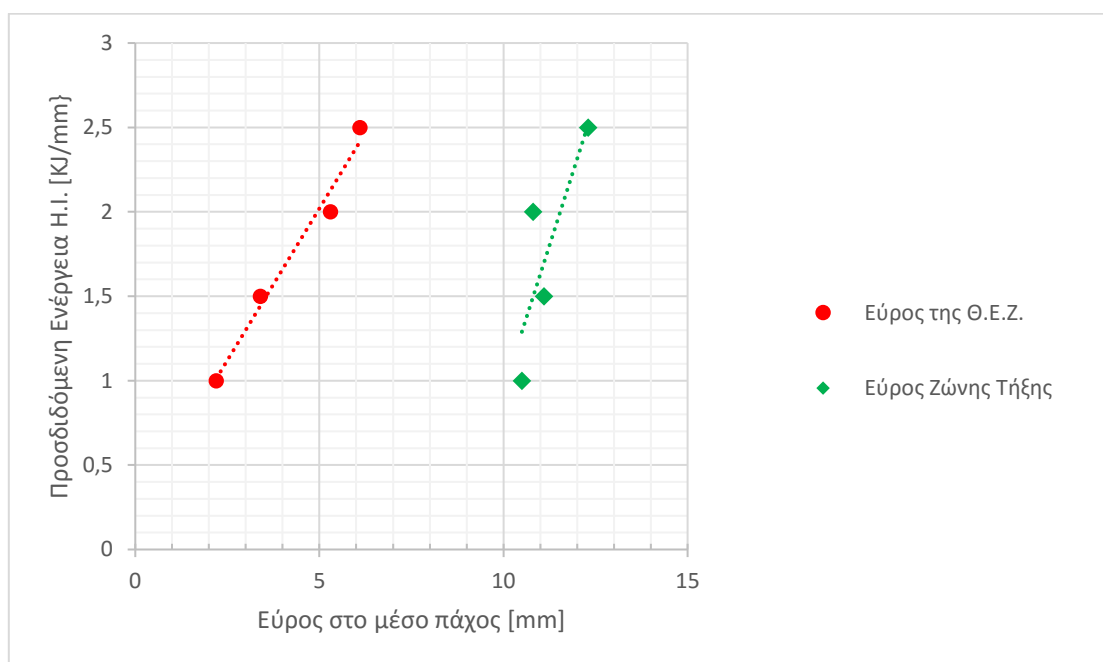
Εικόνα 5.27 Μεθοδολογία υπολογισμού της αραίωσης των μετάλλων βάσης στο μέταλλο προσθήκης.

Τα αποτελέσματα των μετρήσεων που έγιναν για το εύρος της Θ.Ε.Ζ. καθώς και για το ποσοστό αραίωσης του μετάλλου βάσης στο μέταλλο συγκόλλησης φαίνονται στον Πίνακα 5.13 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.13 Αποτελέσματα μέτρησης της αραίωσης του μετάλλου βάσης στο μέταλλο συγκόλλησης και μέτρηση του εύρους της ΘΕΖ.

Δοκίμιο	1	2	3	4
H.I. [kJ/mm]	1.0	1.5	2.0	2.5
Αραίωση Βασικού Μετάλλου %	18	7	13	10
Εύρος Θ.Ε.Ζ στο μέσο του πάχους [mm]	2.2	3.4	5.3	6.1
Εύρος Ζώνης Τήξης στο μέσο του πάχους [mm]	10.1	11.5	10.8	12.3

Στο Διάγραμμα 5.2 φαίνεται ότι το εύρος τόσο της Θ.Ε.Ζ. όσο και της Ζώνης Τήξης στο μέσο του πάχους των δοκιμίων παρουσιάζει αυξητική τάση.



Διάγραμμα 5.2 Διασπορά μετρήσεων του εύρους της Θ.Ε.Ζ. και της Ζώνης Τήξης, στο μέσο του πάχους των δοκιμίων σε σχέση με την προσδιδόμενη ενέργεια συγκόλλησης Η.Ι.

5.6 Μελέτη Μικροσκληροτήτων.

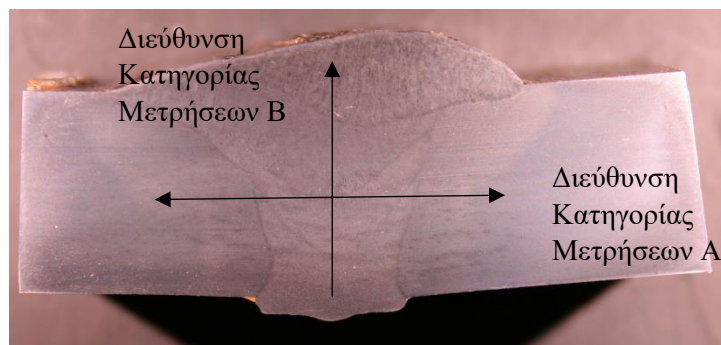
Μετά τη μακροσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων, διεξήχθησαν μετρήσεις μικροσκληρότητας σε δοκίμια τα οποία κόπηκαν εγκάρσια στη διεύθυνση της συγκόλλησης. Οι μετρήσεις μικροσκληρότητας των δοκιμίων έγιναν με τη βοήθεια της διάταξης μέτρησης μικροσκληρότητας Wolpert-Wilson 402 MVD (βλ. Εικ 5.29), που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογίας. Η μέθοδος με την οποία μετρήθηκαν οι μικροσκληρότητες των δοκιμίων, είναι η μέθοδος Vickers HV 0.3.

Τα δοκίμια που κόπηκαν από τις συγκολλήσεις προετοιμάστηκαν κατάλληλα για την έναρξη των μετρήσεων. Αρχικά έγινε λείανση των δοκιμίων, χρησιμοποιώντας τη μηχανή λείανσης LaboPol του E.N.T., με τη χρήση χαρτιών λείανσης τραχύτητας P# 80, 120, 180, 220, 320, 500, 800, 1000, 1200, 2000, 4000, διαδοχικά. Στη συνέχεια ακολούθησε η στίλβωση των δοκιμίων με τη χρήση πάστας Αλούμινας κοκκομετρίας 1μm και 0.1μm. Μετά την παραπάνω διαδικασία ακολούθησε η χημική προσβολή των δοκιμίων με διάλυμα Nital 2% (διάλυμα Αιθανόλης – 2% Νιτρικού Οξέος) προκειμένου να εμφανιστεί η μικροδομή του μετάλλου. Η παραπάνω διαδικασία έχει αναλυθεί λεπτομερώς σε προηγούμενο εδάφιο του Πειραματικού Μέρους της παρούσας διπλωματικής, αφού είναι η ίδια διαδικασία που απαιτείται για την παρατήρηση της μικροδομής των δοκιμίων.

Οι μετρήσεις των μικροσκληροτήτων θα μπορούσαν να γίνουν και χωρίς τη χημική προσβολή των δοκιμίων, αλλά επιλέχθηκαν να γίνουν κατόπιν αυτής, αφού η ανάδειξη της μικροδομής και της «γεωμετρίας» της συγκόλλησης καθιστά δυνατή την παρατήρηση της ακριβούς περιοχής της συγκόλλησης από την οποία λαμβάνεται η κάθε μέτρηση.

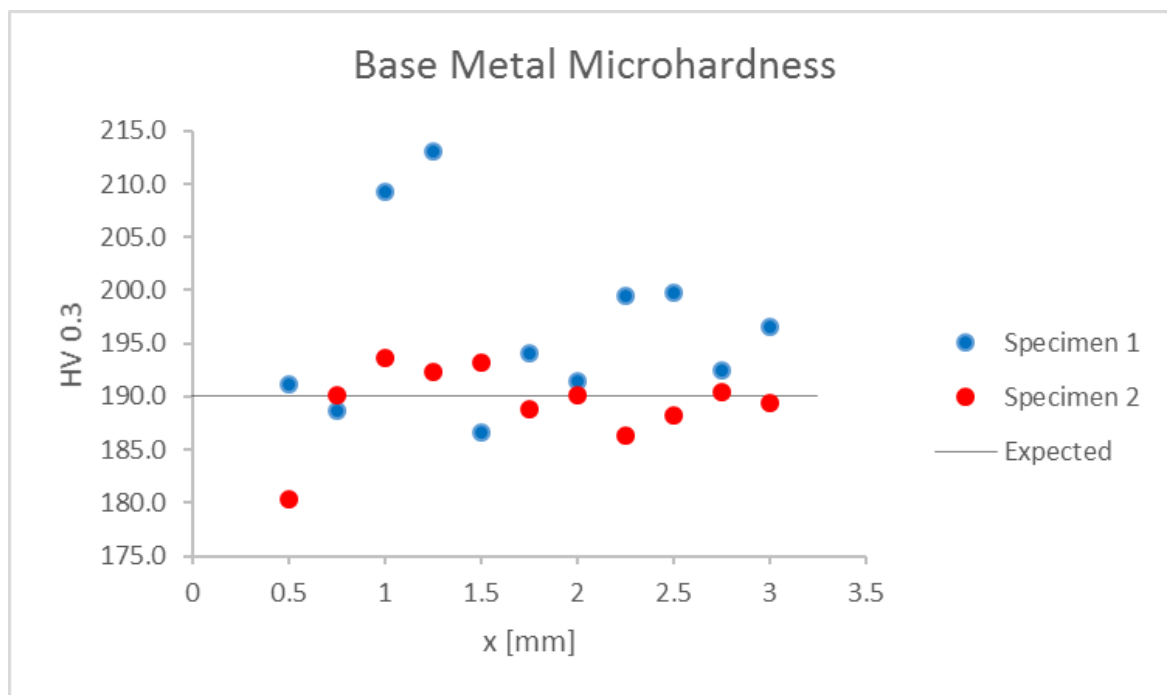
Για την εξαγωγή συμπερασμάτων, σε κάθε ένα δοκίμιο από τις τέσσερις συγκολλήσεις, έγιναν δύο κατηγορίες μετρήσεων. Η πρώτη κατηγορία -Κατηγορία Μετρήσεων Α- αφορά στις μετρήσεις που έγιναν στο μέσο του πάχους των ελασμάτων και παράλληλα στο επίπεδο της ρίζας της συγκόλλησης (Mid – Thickness Measurements). Η δεύτερη κατηγορία μετρήσεων -Κατηγορία Μετρήσεων Β- έγινε κατά τη διεύθυνση του πάχους των ελασμάτων στον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης (Through – Thickness Measurements).

Στην **Κατηγορία Μετρήσεων Α**, οι μετρήσεις ξεκίνησαν από την περιοχή του Μετάλλου Βάσης, και περνώντας διαδοχικά από την Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη και το Μέταλλο Συγκόλλησης κατέληξαν πάλι στην περιοχή του Μετάλλου Βάσης με άξονα συμμετρίας τον άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης. Στην **Κατηγορία Μετρήσεων Β**, οι μετρήσεις ξεκίνησαν από τη ρίζα της συγκόλλησης (Root Pass) και κατέληξαν στο πάσο της ενίσχυσης (Cover Pass), κατά τη διεύθυνση του άξονα συμμετρίας της συγκόλλησης.



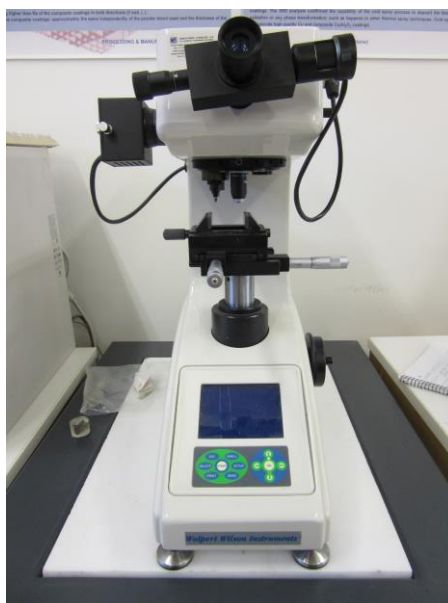
Εικόνα 5.28 Διευθύνσεις κατά τις οποίες διεξήχθησαν οι δύο κατηγορίες Μικροσκληρομετρήσεων.

Για να εκτιμηθούν σωστά τα αποτελέσματα των μικροσκληροτήτων, πραγματοποιήθηκαν μετρήσεις μικροσκληρότητας σε δύο δοκίμια του Μετάλλου Βάσης, η διασπορά των οποίων φαίνεται στο Διάγραμμα 5.3 που ακολουθεί. Πραγματοποιήθηκαν συνολικά 20 μετρήσεις, δηλαδή 10 σε κάθε δοκίμιο. Από το διάγραμμα εξάγεται ότι η μικροσκληρότητα του Base Metal, κυμαίνεται κοντά στα 190 Vickers HV 0.3.



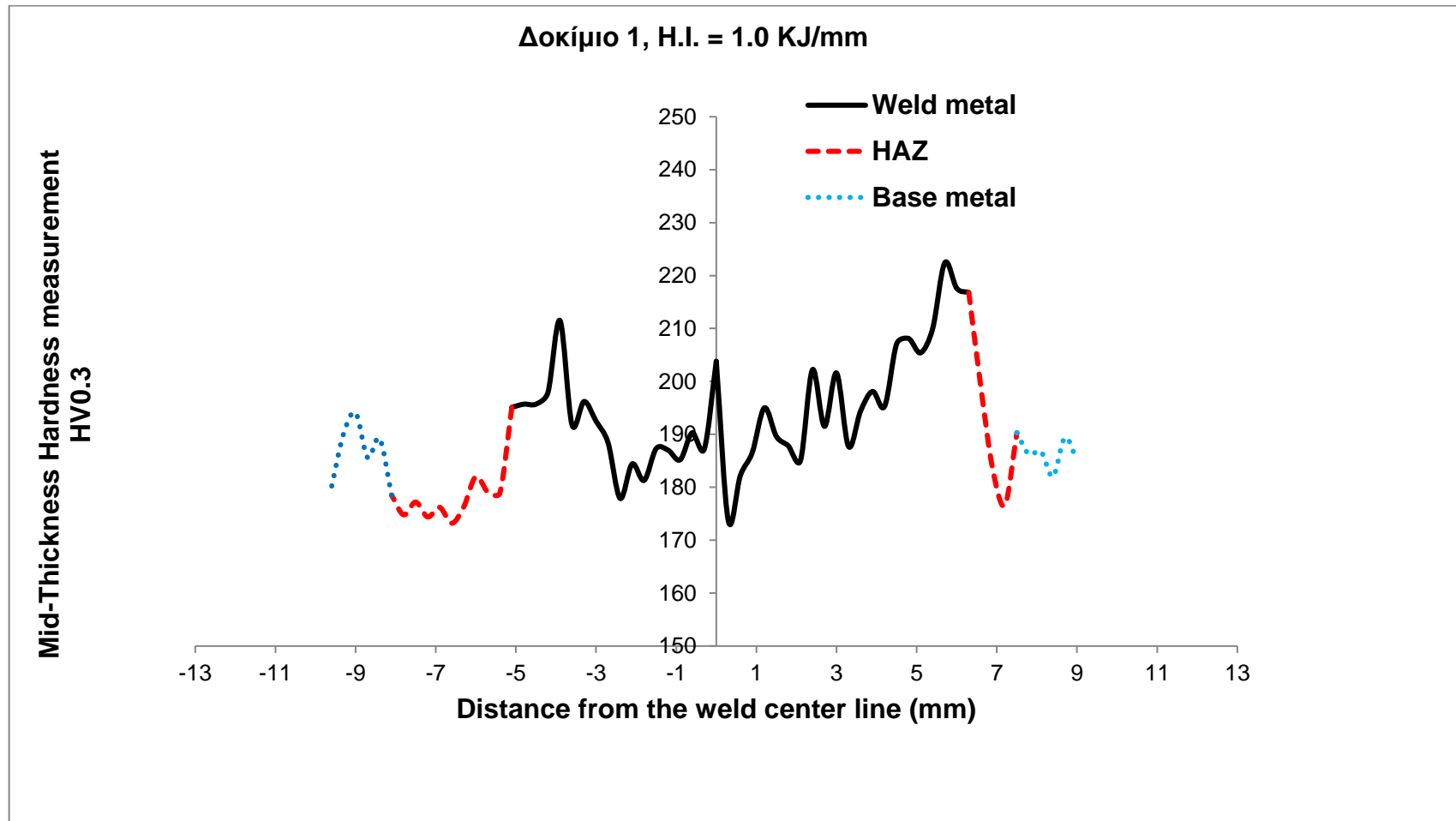
Διάγραμμα 5.3 Διασπορά μετρήσεων στο μέταλλο βάσης.

Στις επόμενες σελίδες παρατίθενται τα διαγράμματα που απεικονίζουν τις μετρήσεις που έγιναν και για τις δύο κατηγορίες μετρήσεων για όλα τα δοκίμια.

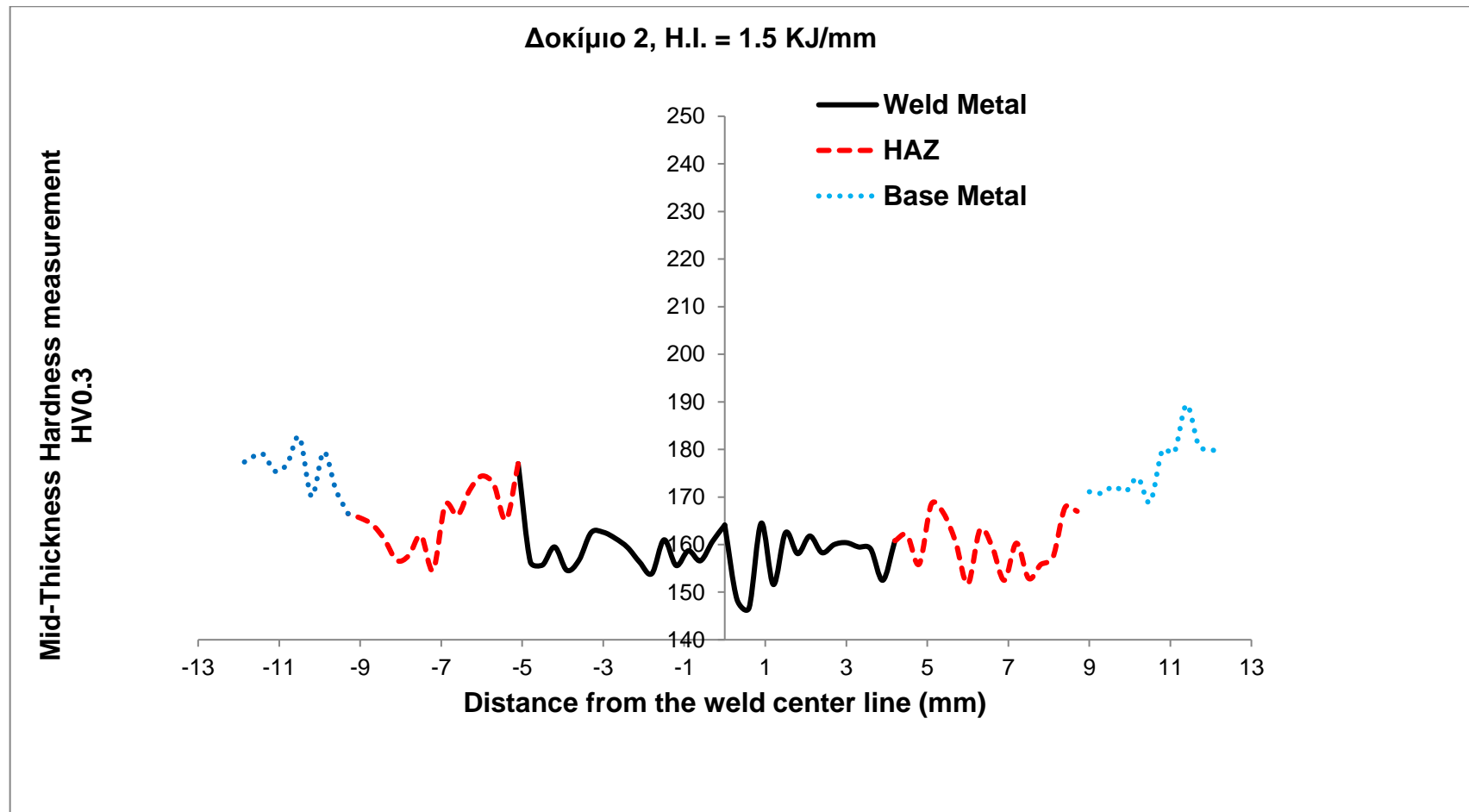


Εικόνα 5.29 Το μικροσκληρόμετρο Wolpert - Wilson 402 MVD του Ε.Ν.Τ.

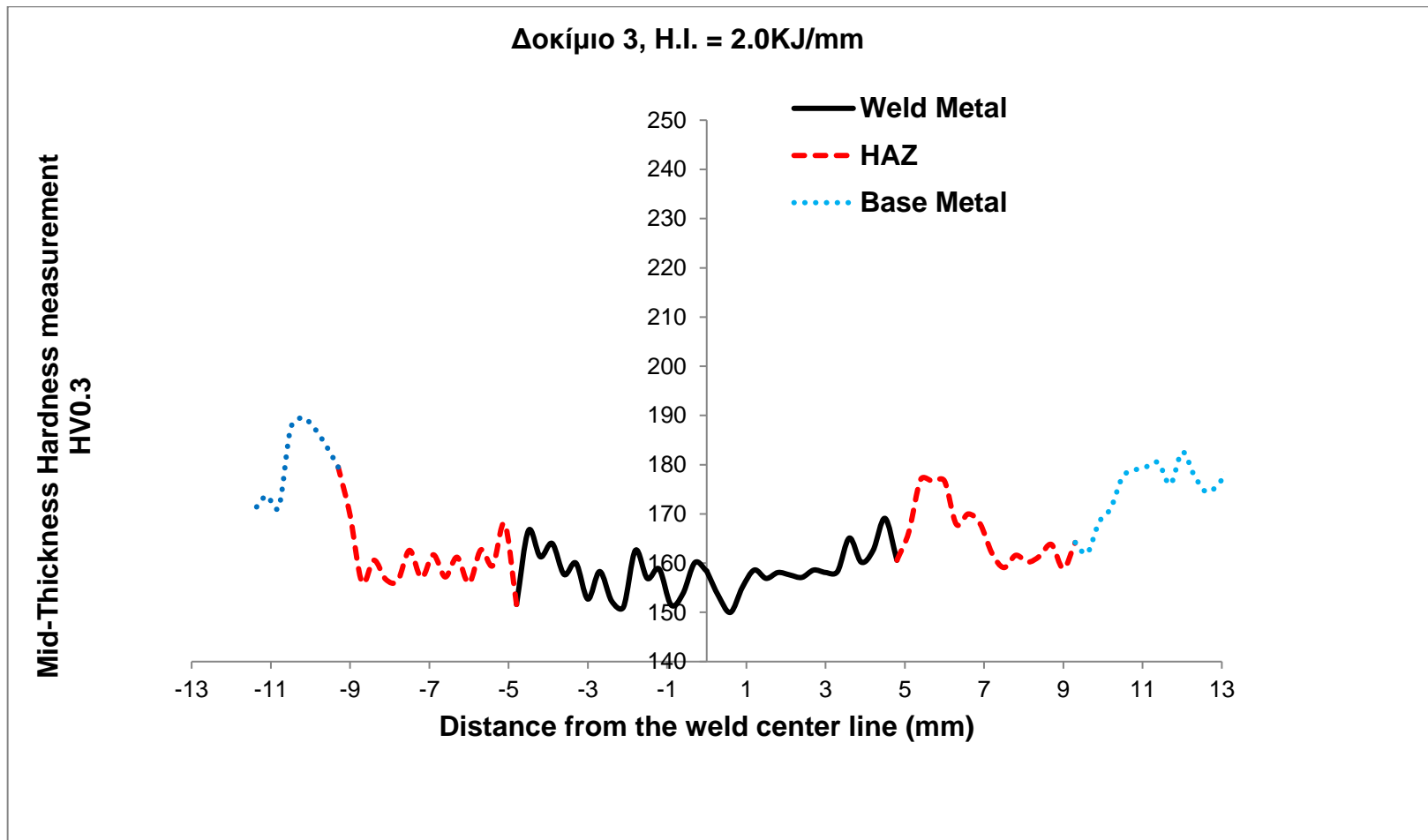
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Α



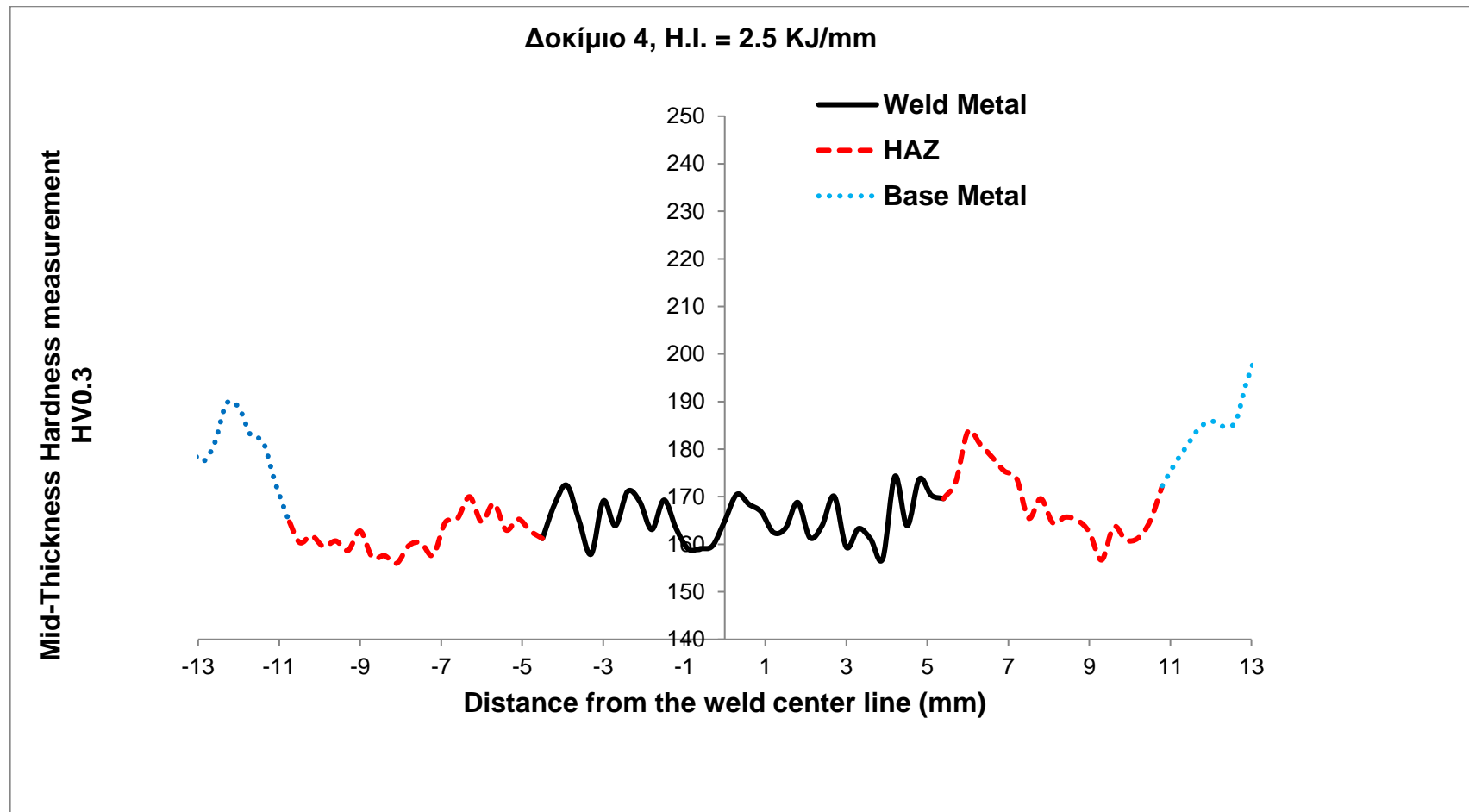
Διάγραμμα 5.4 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας Α, για το Δοκίμιο 1, H.I. = 1.0 kJ/mm.



Διάγραμμα 5.5 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας A, για το Δοκίμιο 2, H.I. = 1.5 kJ/mm.

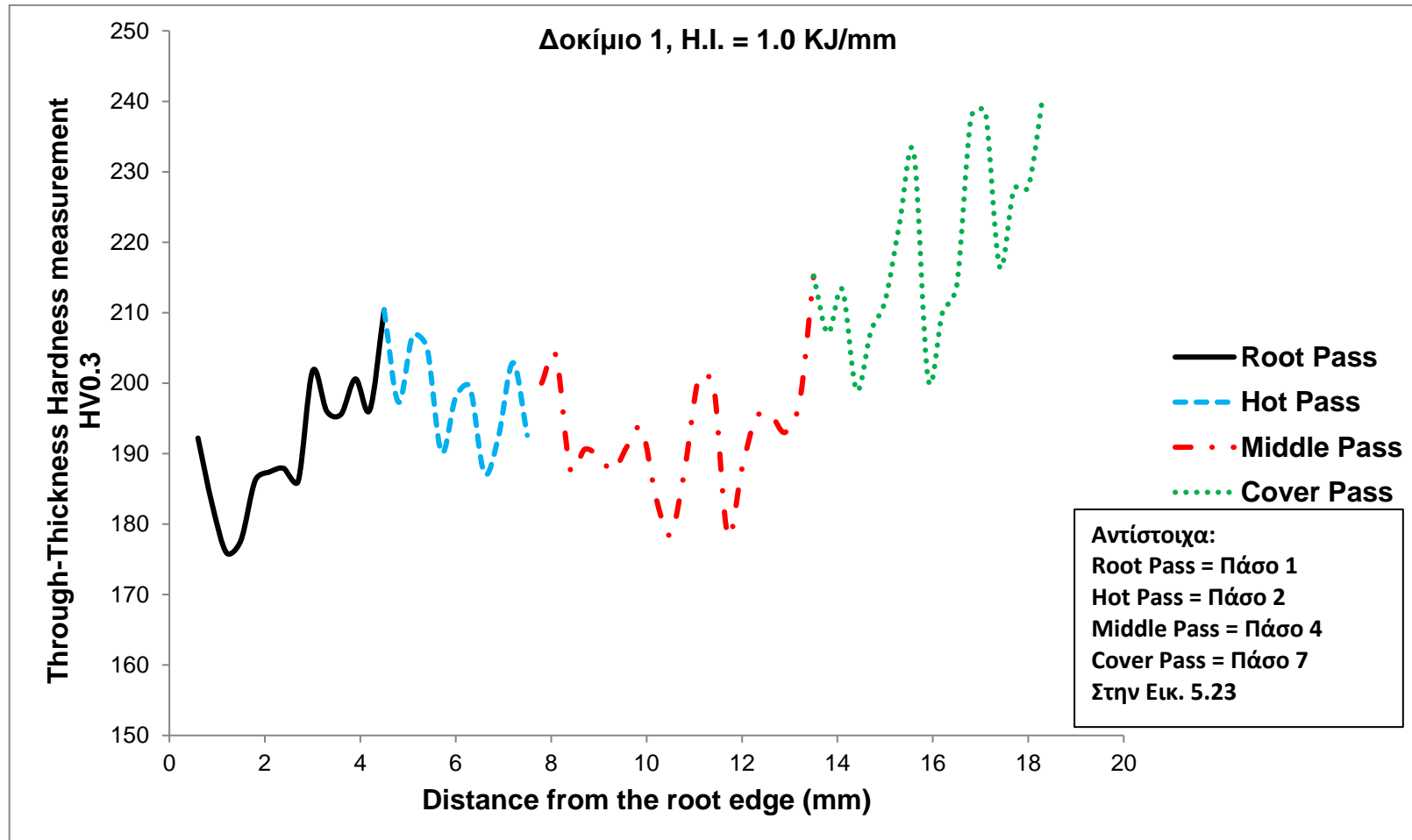


Διάγραμμα 5.6 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας A, για το Δοκίμιο 3, H.I. = 2.0 kJ/mm.

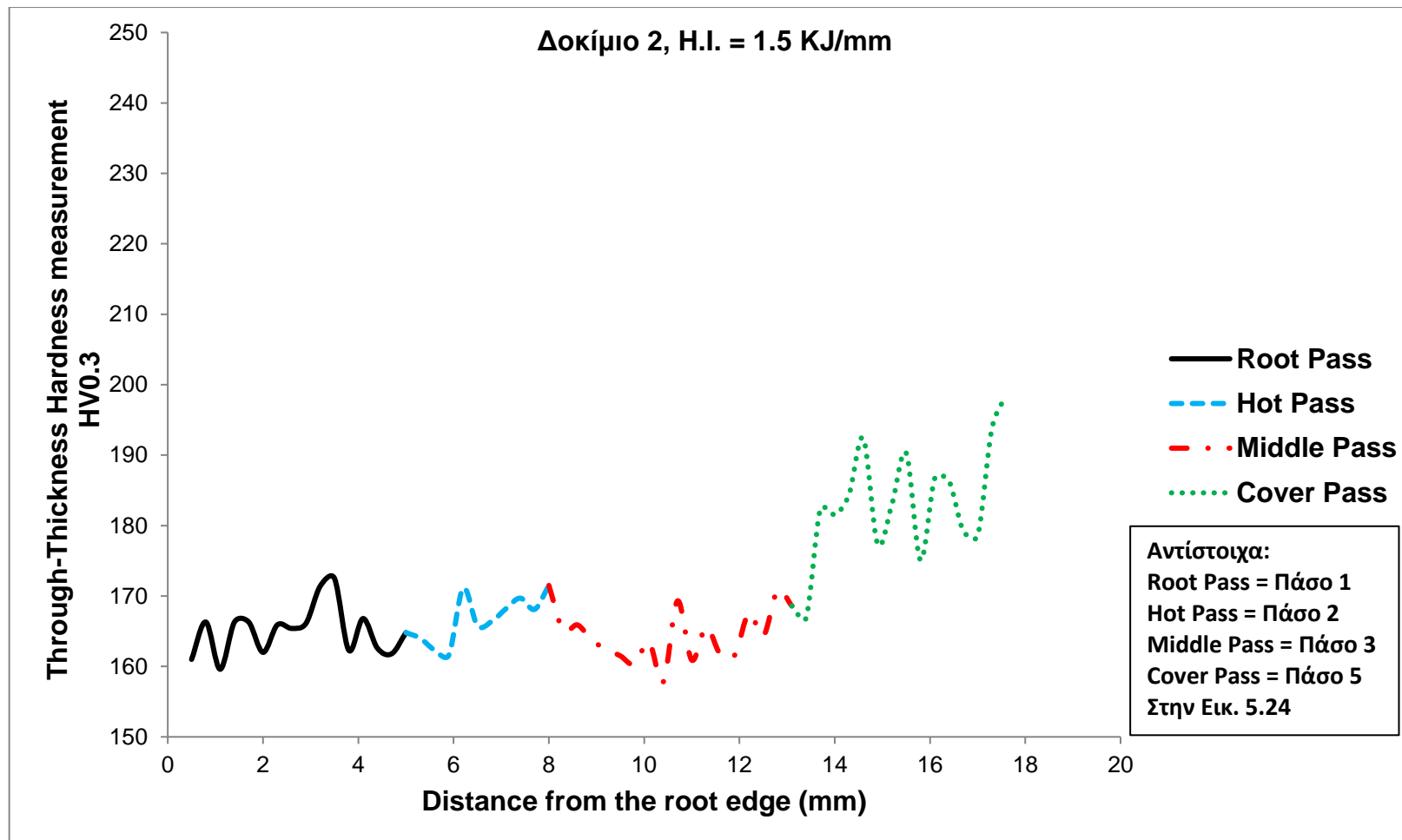


Διάγραμμα 5.7 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας A, για το Δοκίμιο 4, H.I. = 2.5 kJ/mm.

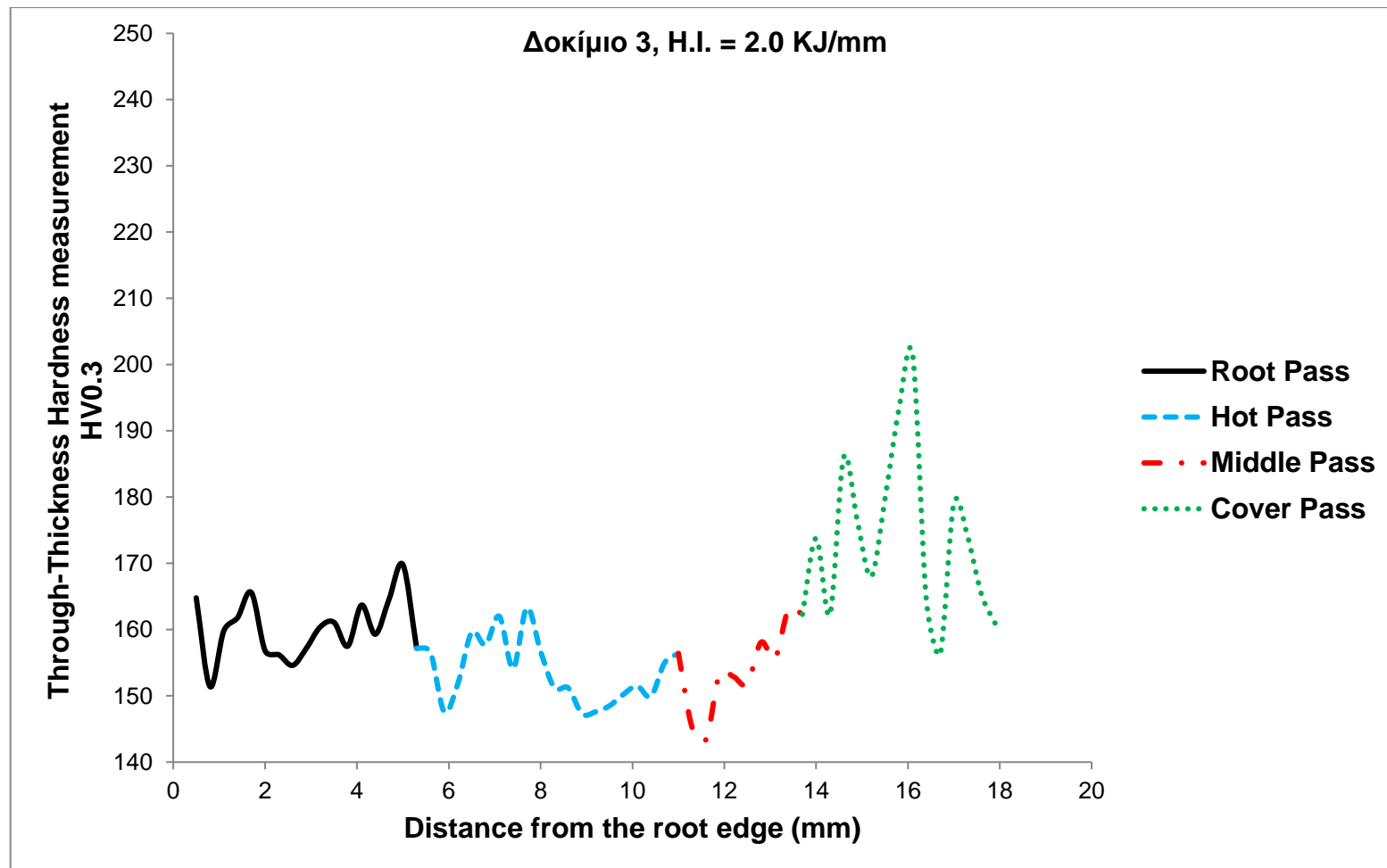
ΔΙΑΓΡΑΜΜΑΤΑ ΚΑΤΗΓΟΡΙΑΣ ΜΕΤΡΗΣΕΩΝ Β



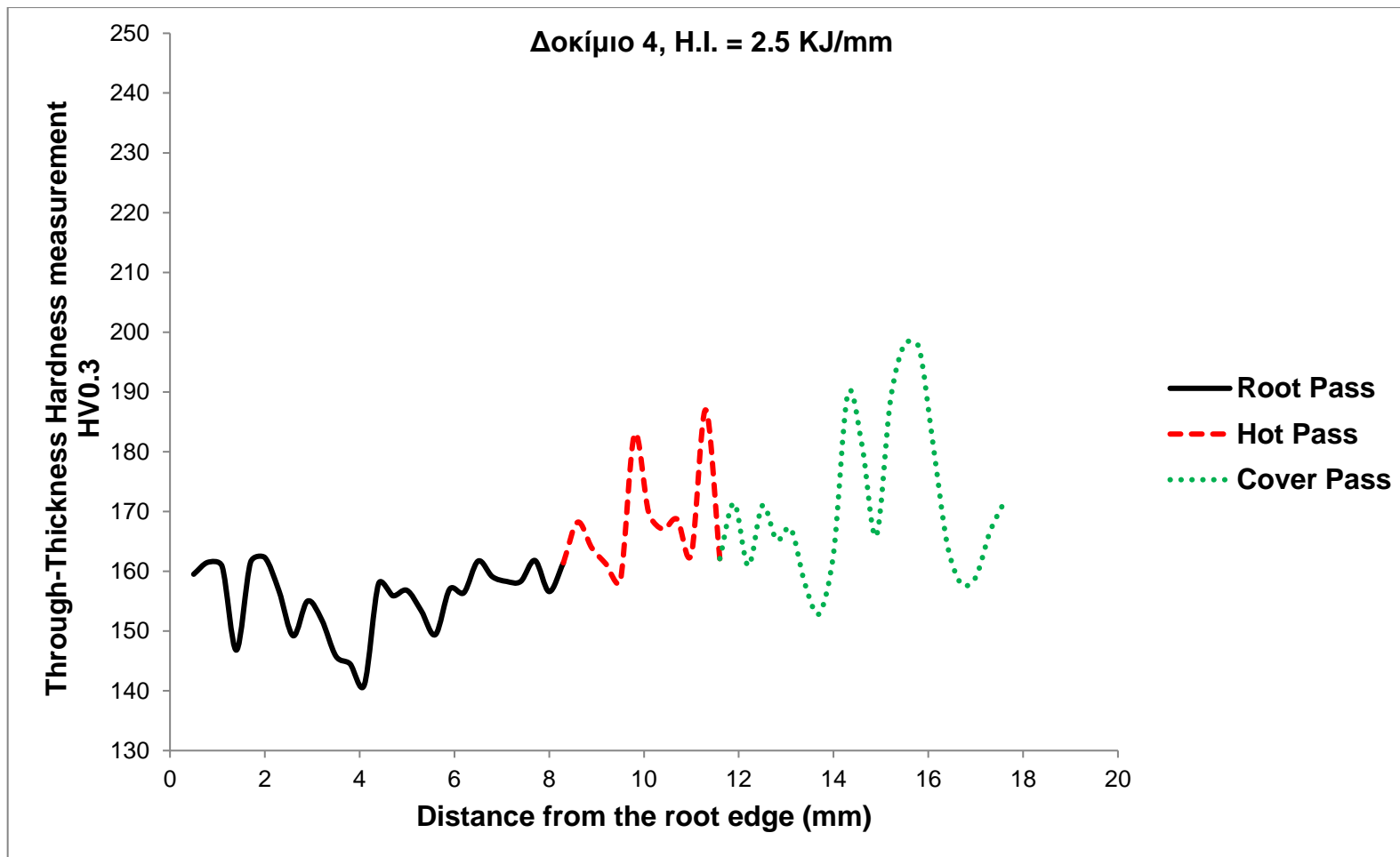
Διάγραμμα 5.8 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας Β, για το Δοκίμιο 1, H.I. = 1.0 kJ/mm.



Διάγραμμα 5.9 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας Β, για το Δοκίμιο 2, H.I. = 1.5 kJ/mm.



Διάγραμμα 5.10 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας B, για το Δοκίμιο 3, H.I. = 2.0 kJ/mm.



Διάγραμμα 5.11 Μετρήσεις μικροσκληροτήτων Κατηγορίας Β, για το Δοκίμιο 4, H.I. = 2.5 kJ/mm.

Τα παραπάνω διαγράμματα μπορούν να οδηγήσουν σε κάποια άμεσα συμπεράσματα για τις αλλαγές στη σκληρότητα της συγκόλλησης, αναλόγως με την εισαγόμενη θερμότητα ανά μονάδα μήκους της συγκόλλησης.

Κατ' αρχάς, παρατηρείται ότι σε όλα τα δοκίμια της **Κατηγορίας Μετρήσεων Β**, η μικροσκληρότητα του μετάλλου συγκόλλησης, λαμβάνει τις μικρότερες τιμές στην περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης (Root Pass) και τις υψηλότερες τιμές στην περιοχή του πάσου της ενίσχυσης (Cover Pass). Αυτό συμβαίνει διότι το κορδόνι της ρίζας δέχεται επαναλαμβανόμενα θερμικά φορτία λόγω της ενέργειας που εισάγεται στη συγκόλληση από τα επόμενα κορδόνια. Το γεγονός αυτό συντελεί στην ύπαρξη πολύ αργού ρυθμού απόψυξης του κορδονιού της ρίζας με αποτέλεσμα οι μετασχηματισμοί των φάσεων του χάλυβα στη συγκεκριμένη περιοχή να οδηγούν στη δημιουργία κυρίως φερρίτη και περλίτη.

Με το ίδιο σκεπτικό εξηγείται και το διάγραμμα του Δοκιμίου 1 (Κατηγορίας Β) που δείχνει ότι παρατηρούνται στο δοκίμιο αυτό οι μεγαλύτερες τιμές μικροσκληροτήτων. Η μικρή ενέργεια συγκόλλησης ανά μονάδα μήκους που προσδίδεται στο συγκεκριμένο δοκίμιο ($H.I. = 1.0 \text{ kJ/mm}$), οδηγεί σε μικροσκληρότητες με μέση τιμή $200.2 \text{ HV } 0.3$.

Επίσης, οι μετρήσεις στα Δοκίμια 2-4, δείχνουν ότι παρουσιάζεται μείωση της σκληρότητας του μετάλλου της ζώνης τήξης, στην περιοχή του μέσου του πάχους των δοκιμίων (περιοχή από Root Pass μέχρι και πριν το Cover Pass) σε σχέση με τη σκληρότητα που παρουσιάζει το μέταλλο βάσης (AH40), της τάξης του 15 – 20%. Η μέση τιμή μικροσκληρότητας που καταγράφηκε στα Δοκίμια 2, 3, 4, είναι 169.9, 160.5, 163.5 HV 0.3 αντίστοιχα.

Όσον αφορά στην **Κατηγορία Μετρήσεων Α**, στα Δοκίμια 2 – 4 παρατηρείται μείωση της σκληρότητας στις περιοχές της Ζώνης Τήξης και της ΘΕΖ κατά 13 – 15% σε σχέση με τη σκληρότητα του μετάλλου βάσης. Η μέση τιμή των μικροσκληροτήτων στα Δοκίμια 2, 3, 4 είναι 164.6, 164.7, 169.1 HV 0.3 αντίστοιχα. Το Δοκίμιο 1, όπως και στην προηγούμενη κατηγορία μετρήσεων, παρουσιάζει αυξημένες σκληρότητες σε σχέση με τα υπόλοιπα δοκίμια με μέση τιμή $190 \text{ HV } 0.3$, επομένως οι σκληρότητες που μετρήθηκαν στο μέταλλο συγκόλλησης του Δοκιμίου 1 παρουσιάζουν μια διασπορά της τάξεως των $25 \text{ HV } 0.3$ γύρω από την τιμή της σκληρότητας του μετάλλου βάσης. Σε όλες τις περιπτώσεις δεν παρατηρήθηκαν ακραίες μετρήσεις που να μην είναι δυνατόν να εξηγηθούν μεταλλουργικά (καμία τιμή δεν υπερέβη τα $320 \text{ HV } 0.3$, όπως ορίζεται για χάλυβες TMCP).

5.7 Μελέτη μικροδομής.

Η χρήση του μικροσκοπίου, γίνεται για την παρατήρηση της δομής που έχει αποκατασταθεί στις διάφορες περιοχές της συγκόλλησης – Μέταλλο Βάσης, Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη, Ζώνη Τήξης – λόγω της νέας χημικής σύστασης που έχει το μέταλλο προσθήκης, αλλά και της επίδρασης που έχει η εισαγόμενη ενέργεια στα δοκίμια.

Η επίδραση της αύξησης της θερμοκρασίας, λόγω της εισαγόμενης θερμότητας, στην αλλαγή της μικροδομής του υλικού στη ΘΕΖ, μπορεί να εκτιμηθεί με τη χρήση του διαγράμματος CCT (Continuous Cooling Transformation Diagram) του χάλυβα.

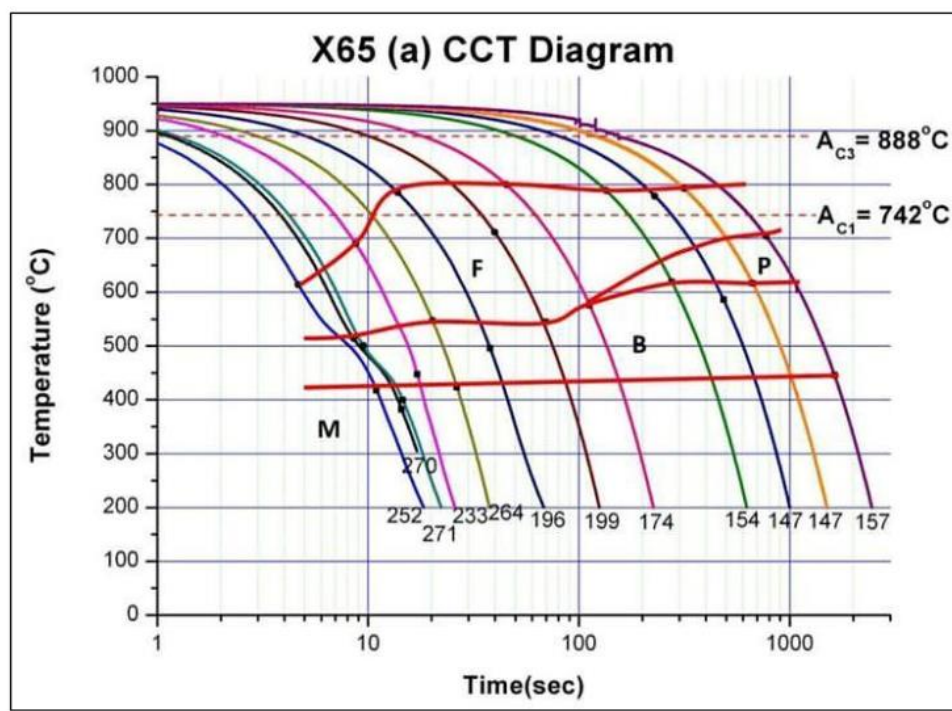
Μετά από εκτενή βιβλιογραφική ανασκόπηση, δεν κατέστη δυνατή η εύρεση του διαγράμματος CCT του χάλυβα AH40 – FCA. Για το λόγο αυτό χρησιμοποιήθηκε το διάγραμμα CCT του χάλυβα X65, ο οποίος έχει παραπλήσια χημική σύσταση με τον χάλυβα που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία. Η χημική σύσταση του χάλυβα X65 φαίνεται στον Πίνακα 5.13 που ακολουθεί.

Πίνακας 5.13 Σύγκριση χημικής σύστασης βοηθητικού χάλυβα X65 με τον AH40.

Στοιχείο	C	Si	Mn	P	S	V	Nb	Ti	Cu	Ni	Cr	Mo
X65	0.06	0.45	1.65	0.02	0.01	0.09	0.05	0.06	-	-	-	-
AH 40	0.0425	0.41	1.45	0.013	0.002	-	0.017	0.008	0.02	0.02	0.16	0.01

Τα δύο κύρια κραματικά στοιχεία, Si, Mn, απαντώνται σε παραπλήσια ποσοστά τόσο στο χάλυβα AH 40 που χρησιμοποιήθηκε όσο και στον χάλυβα X65.

Στην εικόνα που ακολουθεί φαίνεται το διάγραμμα CCT που χρησιμοποιήθηκε.



Διάγραμμα 5.12 Το διάγραμμα CCT που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση των μετασχηματισμών των φάσεων του μετάλλου βάσης στην περιοχή της ΘΕΖ.

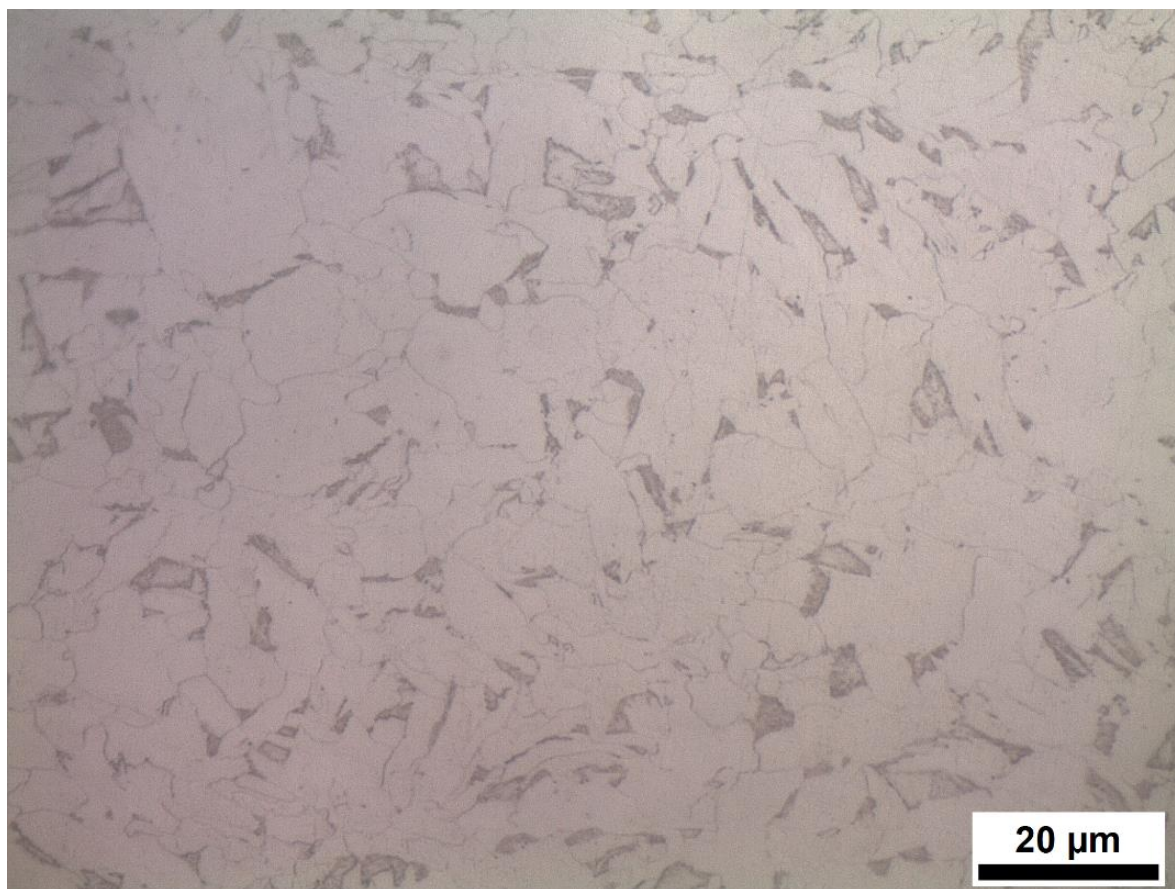
Όπως έχει αποδειχθεί στην παράγραφο 5.6, η σκληρότητα του AH40 είναι περίπου 190 HV. Το διάγραμμα που προηγήθηκε δείχνει ότι για σκληρότητα 190 HV η μικροδομή που αποκαθίσταται αποτελείται αποκλειστικά από φάσεις φερρίτη και μπαινίτη. Επομένως το παραπάνω διάγραμμα τόσο λόγω παραπλήσιας χημικής σύστασης με το μέταλλο βάσης που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική, όσο και παρόμοιας μικροδομής που εμφανίζεται στο μέταλλο, μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την εκτίμηση των αλλαγών στη μικροδομή του μετάλλου βάσης λόγω της προσδιδόμενης θερμότητας.

5.7.1 Παρατήρηση στο οπτικό μικροσκόπιο.

Τη στερεοσκοπική παρατήρηση των δοκιμίων, διαδέχεται η παρατήρησή τους με τη χρήση του οπτικού μικροσκοπίου DM ILM, της εταιρίας Leica Microsystems, που διαθέτει το Ε.Ν.Τ. Η χρήση του οπτικού μικροσκοπίου καθιστά δυνατή την παρατήρηση και τη μελέτη της μικροδομής του Μετάλλου Βάσης, της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης και της Ζώνης Τήξης.

Μέταλλο Βάσης.

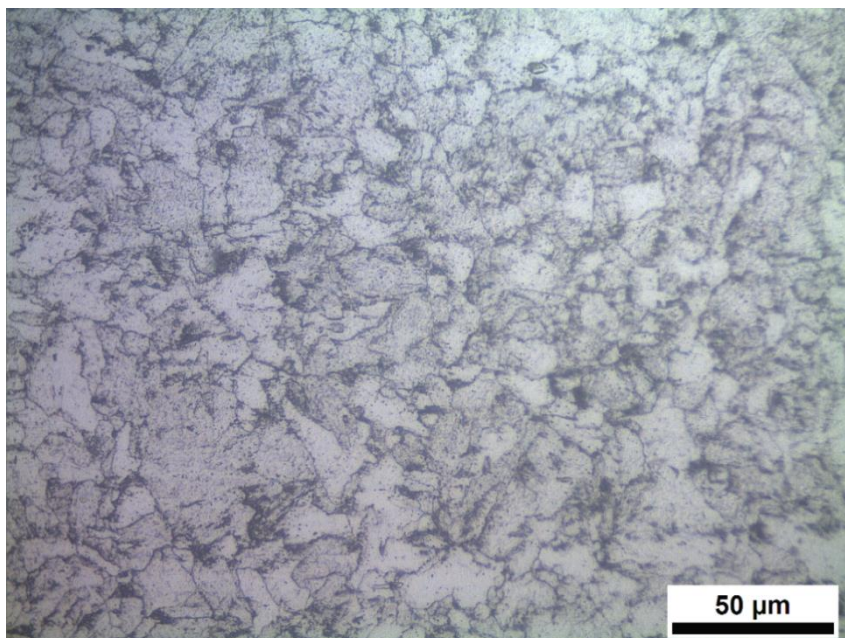
Στην Εικόνα 5.30 που ακολουθεί φαίνεται η μικροδομή του μετάλλου βάσης, AH40 – FCA. Όπως έχει ήδη αναφερθεί σε προηγούμενο εδάφιο, η μικροδομή του μετάλλου βάσης είναι διφασική, αποτελούμενη από εναλλαγές κόκκων φερρίτη και μπαινίτη. Οι λευκές περιοχές αντιπροσωπεύουν τη φάση του φερρίτη, ενώ οι μαύρες τους κόκκους του μπαινίτη.



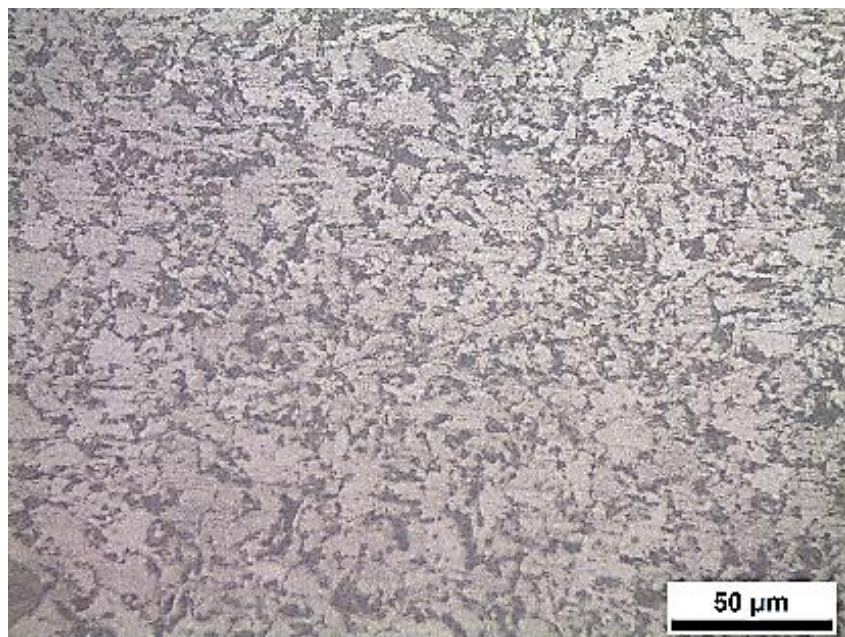
Εικόνα 5.30 Η μικροδομή του μετάλλου βάσης σε μεγέθυνση x1000.

Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη.

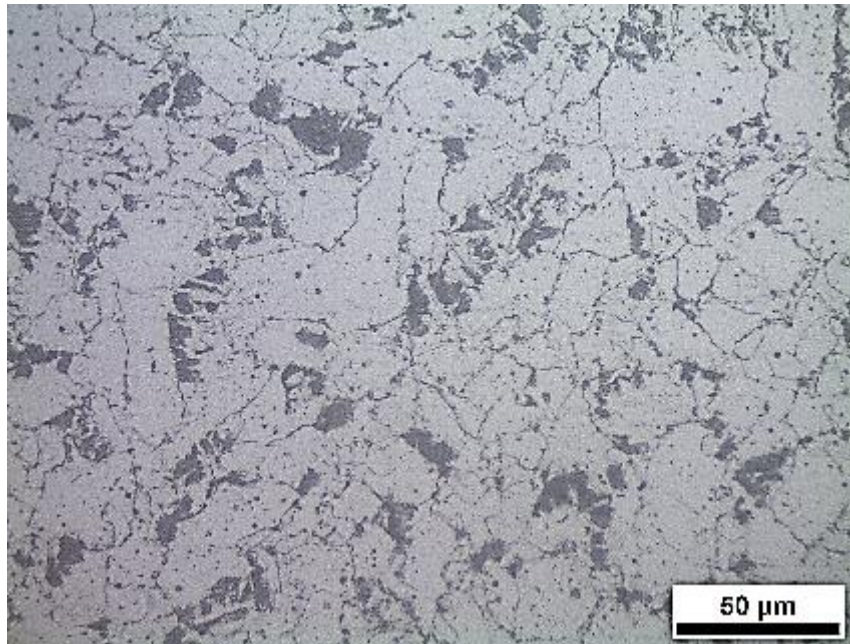
Παρατηρώντας τη μικροδομή των Θερμικά Επηρεασμένων Ζωνών και λαμβάνοντας υπόψη τις μικροσκληρότητες που μετρήθηκαν, σε συνδυασμό με το διάγραμμα CCT του προηγούμενου εδαφίου, εξάγεται το συμπέρασμα ότι μικροδομή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 1 αποτελείται κυρίως από φερρίτη και μπαινίτη, ενώ η μικροδομή των Δοκιμίων 2-4 ($H.I. = 1.5 - 2.5 \text{ kJ/mm}$) είναι κυρίως φερριτο-περλιτική.



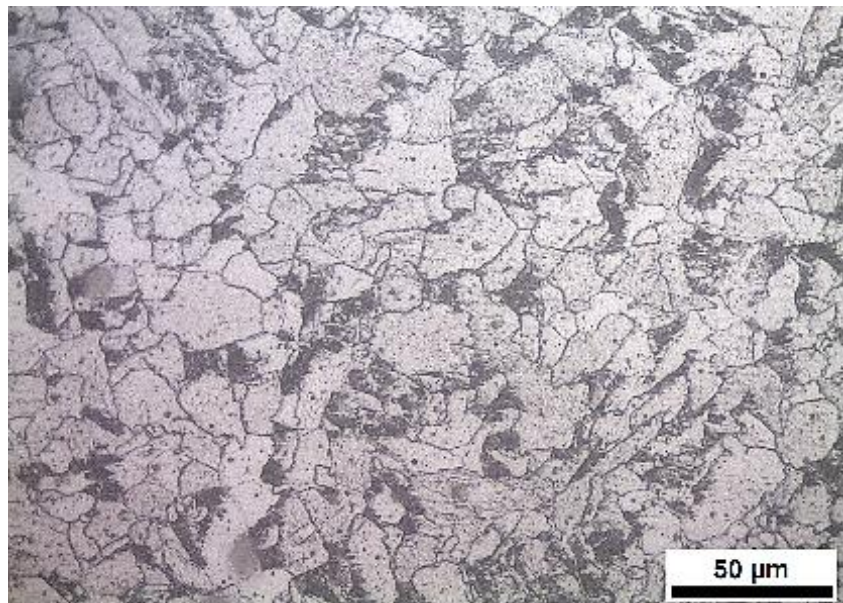
Εικόνα 5.31 Η μικροδομή της ΘΕΖ, του Δοκιμίου 1, $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$.



Εικόνα 5.32 Η μικροδομή της ΘΕΖ, του Δοκιμίου 2, $H.I. = 1.5 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$



Εικόνα 5.33 Η μικροδομή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 3, $H.I. = 2.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$



Εικόνα 5.34 Η μικροδομή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 4, $H.I. = 2.5 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$

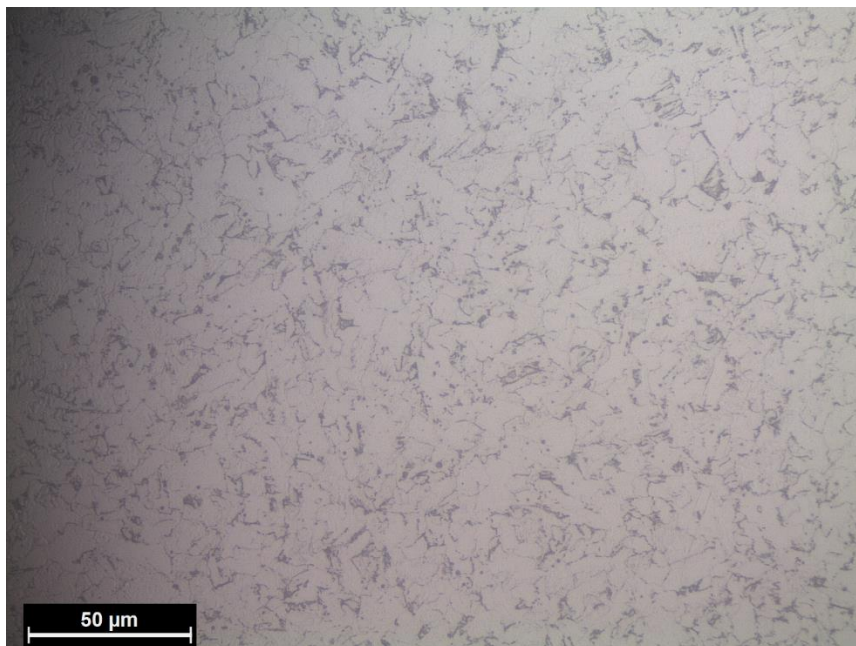
Ακόμα παρατηρώντας τις εικόνες που προηγήθηκαν, φαίνεται ότι:

- 1) Το Δοκίμιο 2 έχει πιο λεπτόκοκκη μικροδομή σε σχέση με τα υπόλοιπα.
- 2) Το Δοκίμιο 4 εμφανίζει μεγαλύτερα ποσοστά ανακρυστάλλωσης λόγω της υψηλότερης ενέργειας συγκόλλησης.

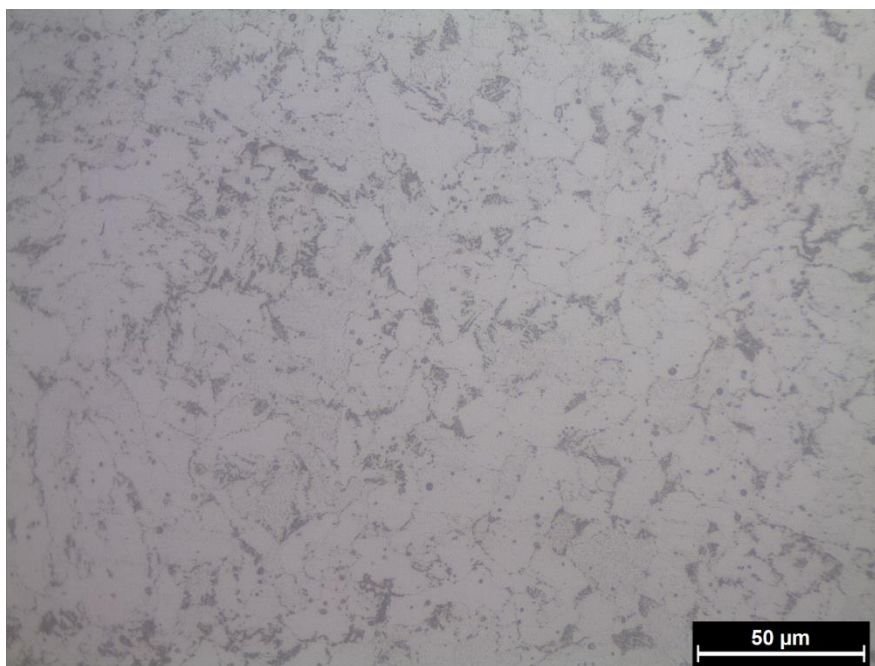
Ζώνη Τήξης

A) Περιοχή της ρίζας

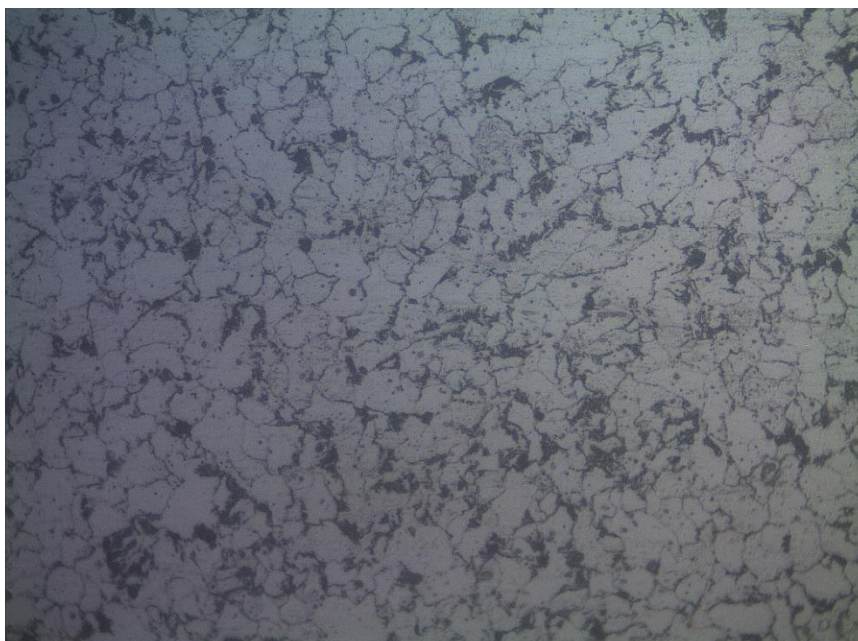
Η μικροδομή της ρίζας της συγκόλλησης χαρακτηρίζεται σε όλα τα δοκίμια από ισοαξονικούς κόκκους, η δημιουργία των οποίων οφείλεται στην επαναλαμβανόμενη αναθέρμανση (ανόπτηση) της περιοχής της ρίζας λόγω των πάσων συγκόλλησης που ακολούθησαν. Στις επόμενες εικόνες φαίνεται η μικροδομή της ρίζας των Δοκιμίων 1-4.



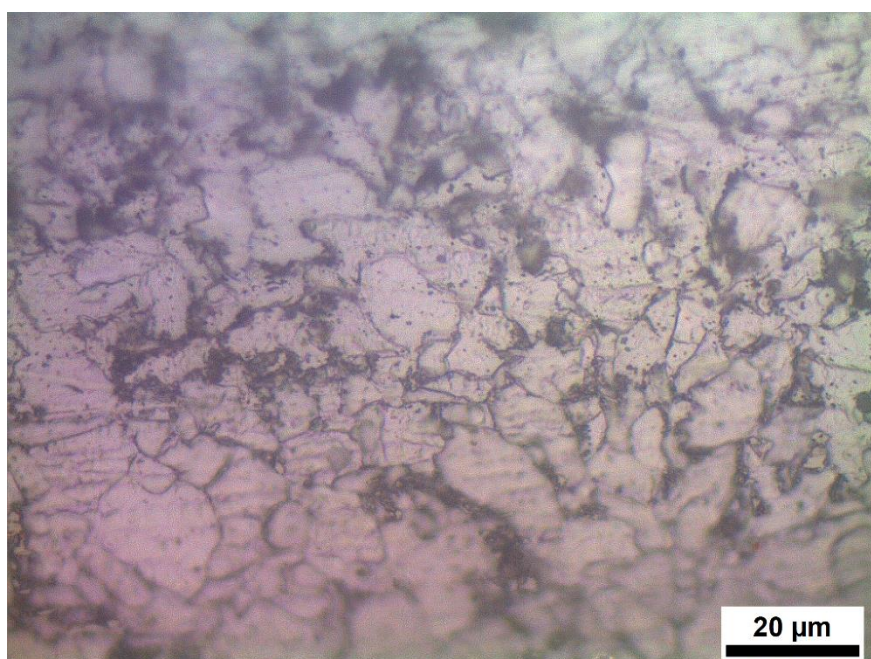
Εικόνα 5.35 Η περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης του Δοκιμίου 1, $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$.



Εικόνα 5.36 Η περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης του Δοκιμίου 2, $H.I. = 1.5 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$.



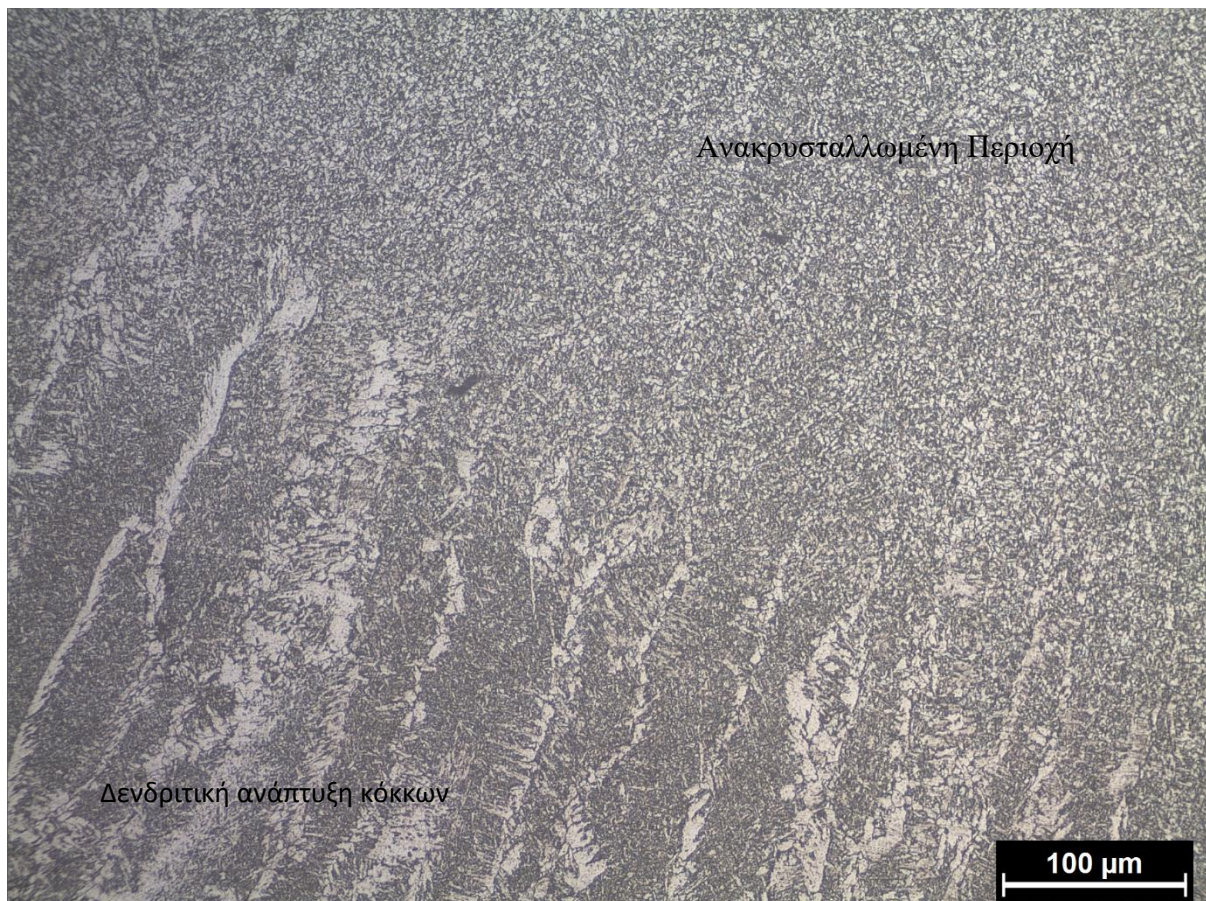
Εικόνα 5.37 Η περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης του Δοκιμίου 3, $H.I. = 2.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$



Εικόνα 5.38 Η περιοχή της ρίζας της συγκόλλησης του Δοκιμίου 4, $H.I. = 2.5 \text{ KJ/mm}$, $\times 1000$

B) Ενδιάμεσα Πάσα

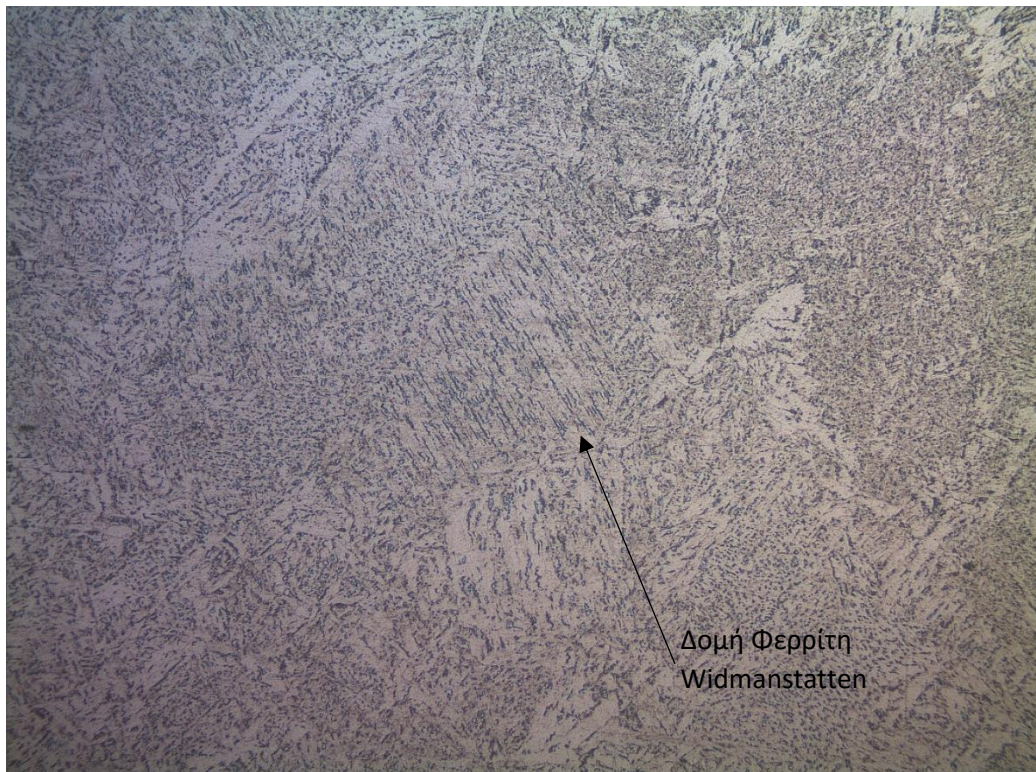
Στο Δοκίμιο 1, υπάρχει εκτεταμένη ανάπτυξη κόκκων δενδριτικής μορφής σε όλα τα πάσα συγκόλλησης, εκτός από τη ρίζα. Οι δενδρίτες, αναπτύσσονται κάθετα στην ισόθερμη στερεοποίησης στην περιοχή του πάσου ενίσχυσης (cover pass) με κατεύθυνση το κέντρο της συγκόλλησης ενώ στα ενδιάμεσα πάσα η ανάπτυξη των κόκκων γίνεται με φορά προς το πάσο της ενίσχυσης. Στην περίπτωση του Δοκιμίου 1 οι ζώνες ανακρυστάλλωσης είναι σχετικά περιορισμένες σε έκταση λόγω της χαμηλής προσδιδόμενης ενέργειας.



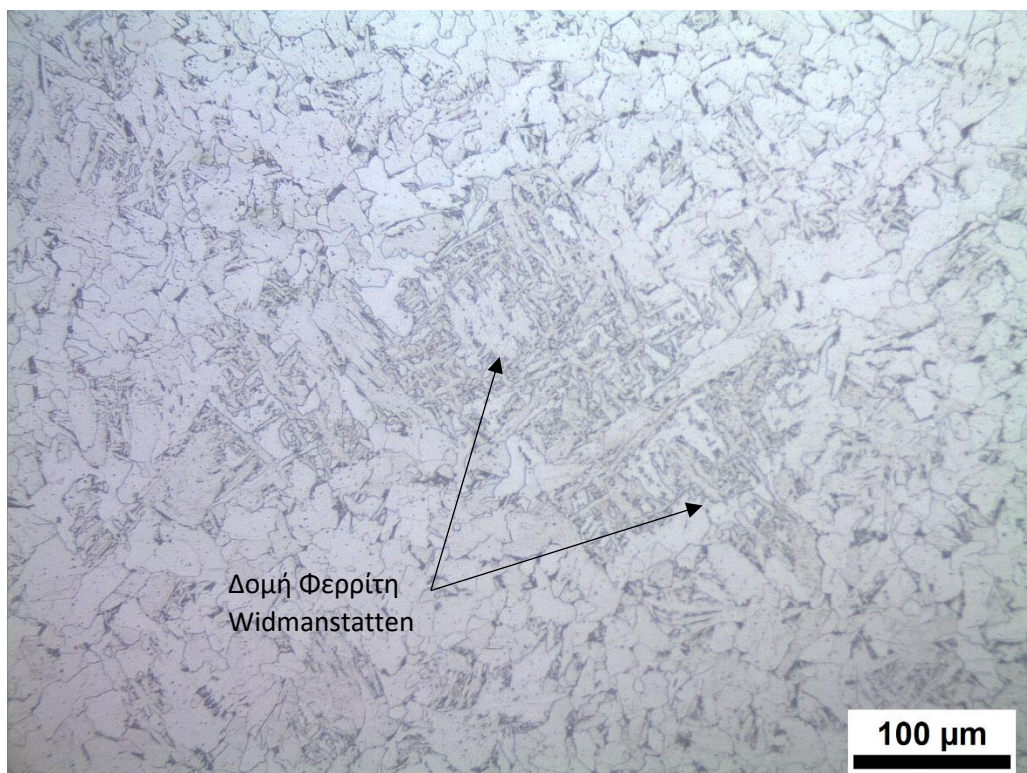
Εικόνα 5.39 Δενδρίτες πάνω από τους οποίους φαίνεται η ανακρυσταλλωμένη περιοχή στο Δοκίμιο 1, $H.I. = 1.0$ KJ/mm , $\times 200$.

Αντίθετα στα Δοκίμια 2-4 παρατηρείται σταδιακή εξάλειψη της δενδριτικής δομής στα ενδιάμεσα πάσα συγκόλλησης και εκτεταμένη ανάπτυξη των ανακρυσταλλωμένων περιοχών όσο αυξάνεται η προσδιδόμενη ενέργεια συγκόλλησης.

Επίσης, στην ζώνης τήξης παρατηρούνται μικρές νησίδες φερρίτη Widmanstätten βελονοειδούς μορφολογίας, ιδιαίτερα στην περιοχή του πάσου ενίσχυσης.



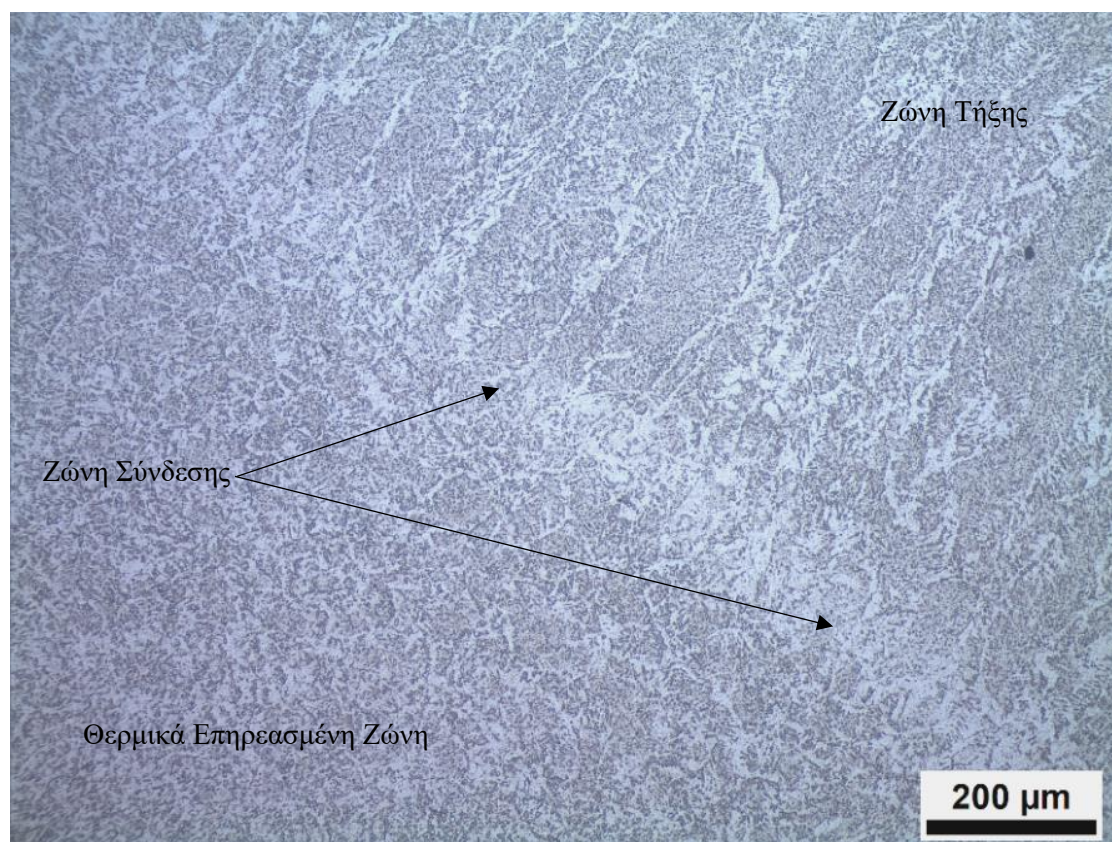
Εικόνα 5.40 Ανάπτυξη φερρίτη δομής Widmanstatten, Δοκίμιο 1, $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 500$



Εικόνα 5.41 Ανάπτυξη φερρίτη δομής Widmanstatten στην περιοχή μεταξύ ΘΕΖ και Ζώνης Σύνδεσης, Δοκίμιο 3, $H.I. = 2.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 1000$.

Ζώνη Σύνδεσης

Είναι η περιοχή στην οποία συνδέεται η Ζώνη Τήξης, με τη Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη, και το εύρος της κυμαίνεται στα 200 μm .



Εικόνα 5.42 Απεικόνιση της Ζώνης Σύνδεσης του Δοκιμίου 1. Στην εικόνα φαίνονται από αριστερά, η ΘΕΖ, η Ζώνη Σύνδεσης, η Ζώνη Τήξης,

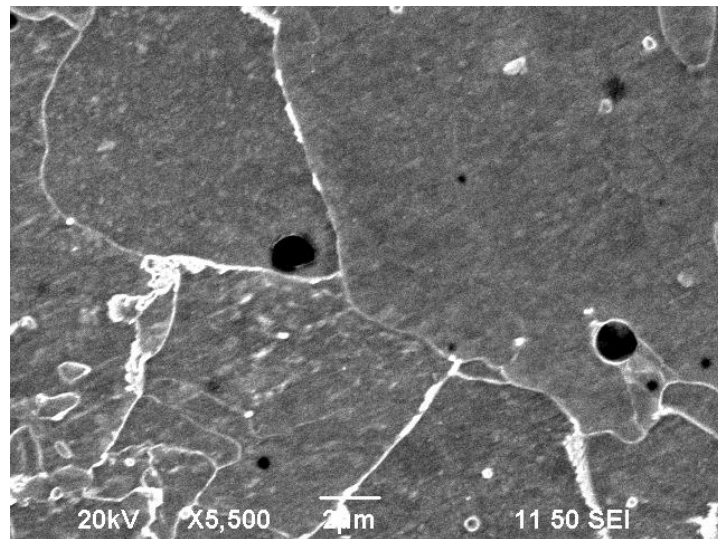
5.7.2 Παρατήρηση στο Ηλεκτρονικό Μικροσκόπιο.

Η χρήση του ηλεκτρονικού μικροσκοπίου έγινε για την περαιτέρω μεγέθυνση της μικροδομής των συγκολλήσεων, πέρα από 1000x που δύναται να μεγεθύνει το οπτικό μικροσκόπιο του Ε.Ν.Τ. Το ηλεκτρονικό μικροσκόπιο σάρωσης (Scanning Electron Microscope) που χρησιμοποιήθηκε στην παρούσα διπλωματική εργασία είναι το SEM Jeol 6390 που διαθέτει το Εργαστήριο Ναυπηγικής Τεχνολογία.

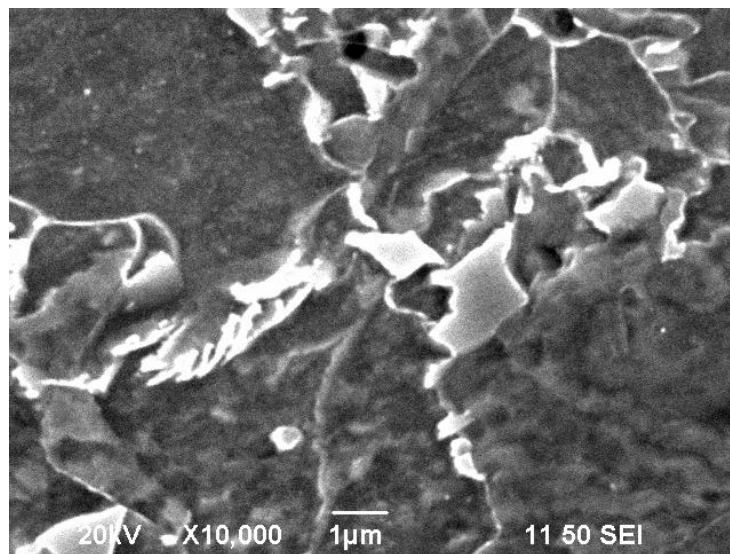
Από την παρατήρηση της μικροδομής στο ηλεκτρονικό μικροσκόπιο, επιβεβαιώνονται οι παρατηρήσεις που έγιναν μέσω του οπτικού μικροσκοπίου. Επίσης, έγινε δυνατή η παρατήρηση του μικροπορώδους που εμφανίζει η μικροδομή σε διάφορες περιοχές όλων των δοκιμίων, το μέγεθος του οποίου, είναι της τάξης των 1 – 10 μm .

Παρακάτω παρουσιάζονται ενδεικτικά κάποιες ηλεκτρονικές μικρογραφίες από δύο Δοκίμια.

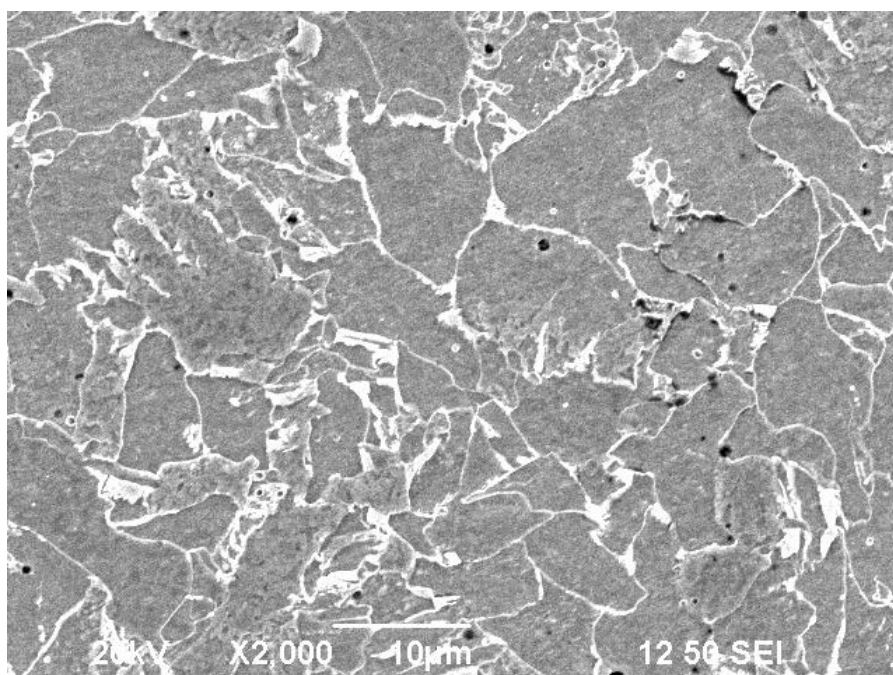
Θερμικά Επηρεασμένη Ζώνη



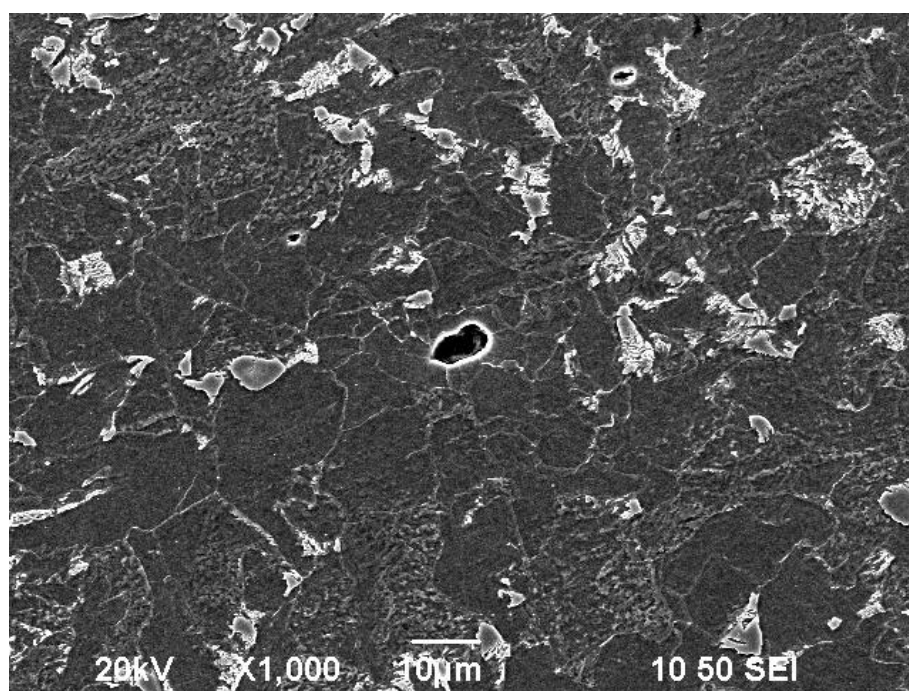
Εικόνα 5.43 Η περιοχή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 1, H.I. = 1.0 KJ/mm, x 5500.



Εικόνα 5.43 Η περιοχή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 1, H.I. = 1.0 KJ/mm, x 10000.

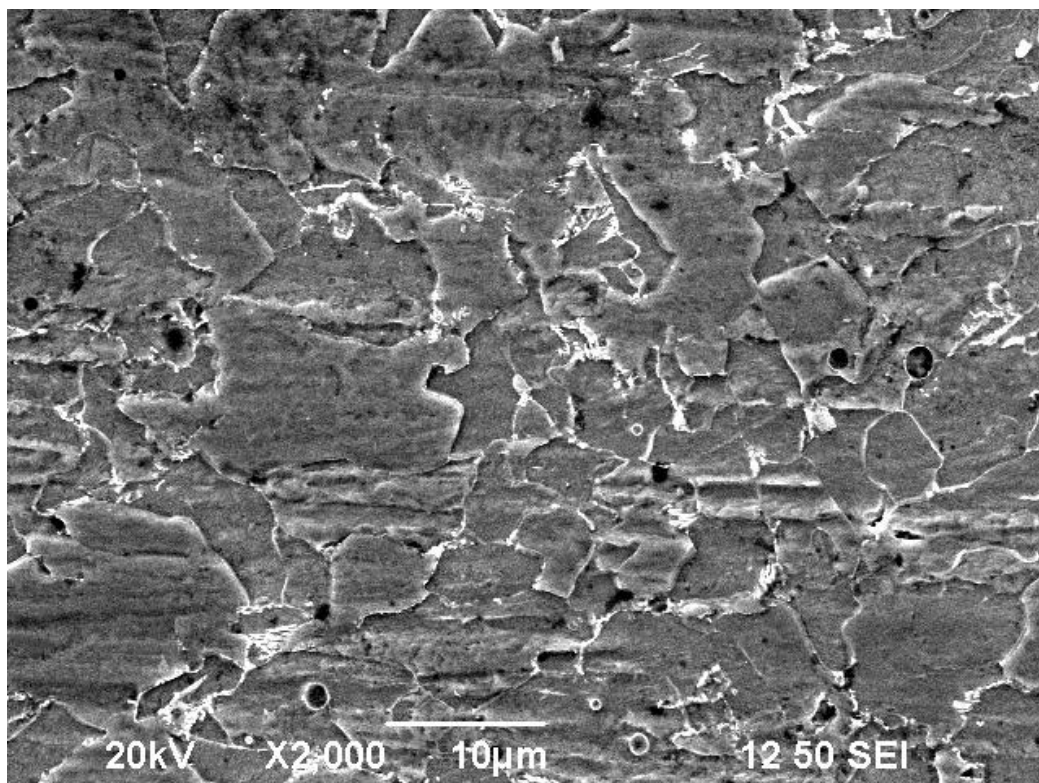


Εικόνα 5.44 Η ΘΕΖ του Δοκιμίου 1, $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$. Οι λευκές περιοχές αποτελούν τους κόκκους του μπαινίτη, ενώ οι γκριζες τον φερρίτη, $\times 2000$.

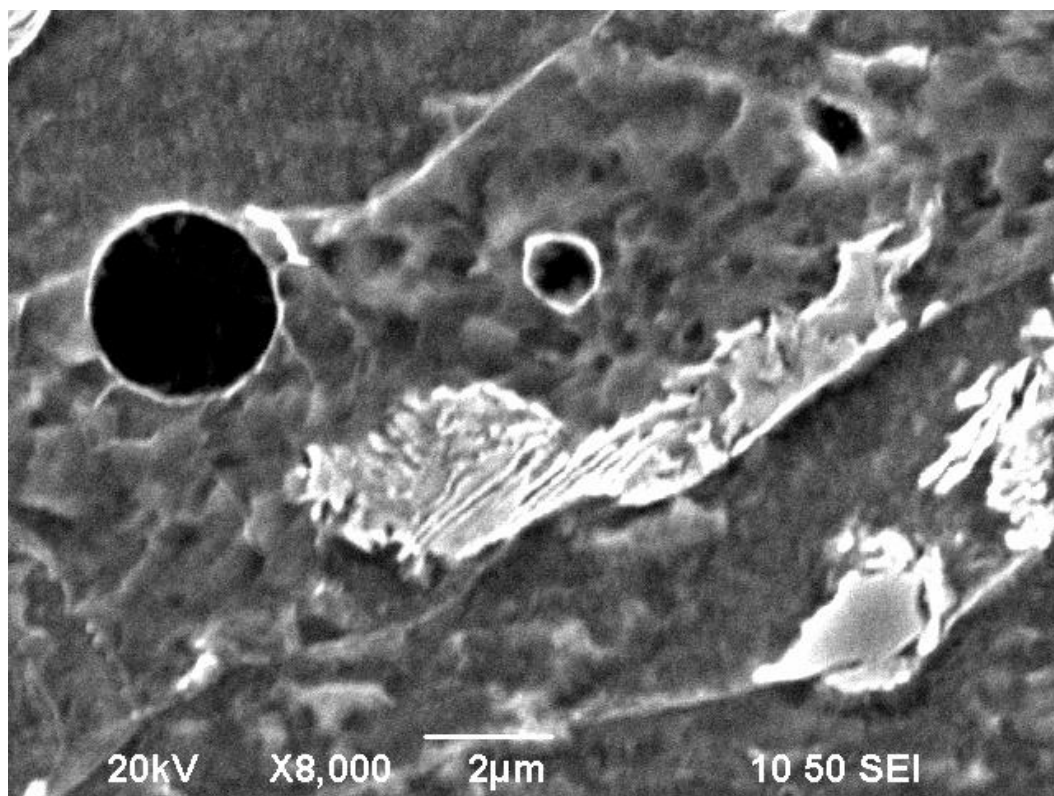


Εικόνα 5.45 Η περιοχή της ΘΕΖ του Δοκιμίου 4, $H.I. = 2.5 \text{ KJ/mm}$, $\times 1000$.

Ζώνη Τήξης



Εικόνα 5.46 Περιοχή της ρίζας του Δοκιμίου 1, $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, $\times 2000$.



Εικόνα 5.47 Μικροπόρος στην περιοχή της Ζώνης Τήξης του Δοκιμίου 4, $H.I = 2.5 \text{ KJ/mm}$. Το μέγεθος του πόρου, διακρίνεται μέσω της κλίμακας της εικόνας, περίπου ίσο με $2 \mu\text{m}$, $\times 8000$.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ ΚΕΦΑΛΑΙΟΥ 5

- [1] BS EN ISO 1011. Welding recommendations for welding metallic materials. Part 1: General guidance for arc welding. BSI, UK 2009
- [2] M. Kazasidis, D. I. Pantelis, *Parametric analysis of the stringer bead reinforcement area and prediction of the number of beads in a single-V butt joint, using the robotic Flux Cored Arc Welding technique*, International Journal of Advanced Manufacturing Technology, May 2016

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 6

Συμπεράσματα

Η παρούσα διπλωματική εργασία αφορά στη μελέτη συγκολλήσεων πολλαπλών πάσων με τη μέθοδο MCAW, ελασμάτων χάλυβα AH40 – FCA, ο οποίος έχει κατασκευαστεί με τη χρήση μεθόδου TMCP. Συνολικά διεξήχθησαν τέσσερις συγκολλήσεις με ενέργειας συγκόλλησης από $H.I. = 1 \text{ KJ/mm}$ έως 2.5 KJ/mm , με βήμα 0.5. Τα ελάσματα που συγκολλήθηκαν ήταν διαστάσεων $350 \times 150 \times 13 \text{ mm}^3$.

Τα αποτελέσματα της πειραματικής διαδικασίας οδηγούν στα εξής συμπεράσματα:

- Το Δοκίμιο 1, παρουσίασε τις μεγαλύτερες τιμές **μικροσκληροτήτων** τόσο στην περιοχή της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης, όσο και στην περιοχή της Ζώνης Τήξης. Λαμβάνοντας υπόψη και τις δύο κατηγορίες μετρήσεων που έγιναν, η μέση τιμή της μικροσκληρότητας του Δοκιμίου 1, στην περιοχή της Ζώνης Τήξης είναι $196 \text{ HV } 0.3$. Επίσης η τιμή της μικροσκληρότητας στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ. είναι $185 \text{ HV } 0.3$. Οι κατανομές των μικροσκληρομετρήσεων δείχνουν ότι η για $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, οι μικροσκληρότητες δεν μεταβάλλονται σε σχέση με αυτές που εμφανίζει το Μέταλλο Βάσης. Τα Δοκίμια 2, 3, 4 παρουσίασαν εμφανή πτώση της μικροσκληρότητας στην περιοχή της Ζώνης Τήξης. Στα Δοκίμια 2,4 η μείωση της μικροσκληρότητας στην περιοχή αυτή, σε σχέση με το Μέταλλο Βάσης ήταν 14%, ενώ στο Δοκίμιο 3 η μικροσκληρότητα μειώθηκε κατά 17%. Αντίστοιχα στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ. τα Δοκίμια 2,3 εμφάνισαν μέση τιμή μικροσκληροτήτων $164 \text{ HV } 0.3$, και το Δοκίμιο 4 $165 \text{ HV } 0.3$. Η ποσοστιαία πτώση των μικροσκληροτήτων στην περιοχή της Θ.Ε.Ζ., για τα Δοκίμια 2-4 είναι 14-15% σε σχέση με τη μικροσκληρότητα του Μετάλλου Βάσης. Από τα παραπάνω συμπεραίνεται ότι η αύξηση της ενέργειας της συγκόλλησης πέραν του $H.I. = 1.0 \text{ KJ/mm}$, οδηγεί σε πτώση της μικροσκληρότητας έως και 17%, συνολικά, στην περιοχή της συγκόλλησης. Η χαμηλή ενέργεια συγκόλλησης φαίνεται να οδηγεί σε τιμές μικροσκληρότητας που κυμαίνονται γύρω από τη μικροσκληρότητα του μετάλλου βάσης, ενώ η αύξηση της προσδιδόμενης ενέργειας οδηγεί σε πτώση των τιμών των μικροσκληροτήτων σε σχέση με τη μικροσκληρότητα του μετάλλου βάσης.
- Σε όλα τα δοκίμια παρατηρήθηκε ολική ανακρυστάλλωση της **περιοχής της ρίζας της συγκόλλησης**, γεγονός που οφείλεται στα επαναλαμβανόμενα θερμικά φορτία που δέχεται το πάσο αυτό, από τα πάσα που εναποτίθενται μετά από αυτό. Στο Δοκίμιο 1, παρατηρείται ότι πέρα από το πάσο της ρίζας, που έχει υποστεί πλήρη ανακρυστάλλωση και οι κόκκοι είναι πλέον ισοαξονικοί, **τα ενδιάμεσα πάσα**, εμφανίζουν μερική ανακρυστάλλωση της δενδριτικής δομής που έχουν τα πάσα μετά τη στερεοποίηση. Σταδιακά, η αύξηση της ενέργειας οδηγεί στην πλήρη ανακρυστάλλωση των ενδιάμεσων πάσων, όπως φαίνεται στο Δοκίμιο 4. Η παρατήρηση στο μικροσκόπιο καθώς και οι μετρήσεις των μικροσκληροτήτων σε συνδυασμό με το διάγραμμα CCT, οδηγούν στο συμπέρασμα ότι **η μικροδομή της Θ.Ε.Ζ.** του Δοκιμίου 1, αποτελείται κυρίως από φερρίτη και μπαινίτη, ενώ η μικροδομή των υπολοίπων Δοκιμίων, στην περιοχή αυτή, είναι κυρίως φερριτοπερλιτική.
- Η αύξηση της **ενέργειας συγκόλλησης**, επιδρά στην αύξηση του εύρους της Θερμικά Επηρεασμένης Ζώνης στην περιοχή του μέσου πάχους των Δοκιμίων.
- Η χαμηλή **ενέργεια συγκόλλησης** βάσει των αποτελεσμάτων της πειραματικής διαδικασίας, φαίνεται να αποδίδει δοκίμια με τη βέλτιστη μικροδομή καθώς και με βέλτιστη κατανομή των μικροσκληροτήτων, τόσο στην περιοχή της ΘΕΖ όσο και στην περιοχή της Ζώνης Τήξης. Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να οδηγήσει στο συμπέρασμα ότι οι χαμηλές ενέργειες συγκόλλησης δεν επηρεάζουν σημαντικά τις μηχανικές

ιδιότητες της συγκόλλησης σε σχέση με αυτές του μετάλλου βάσης. Για την επίρρωση του συμπεράσματος αυτού απαιτείται ο έλεγχος των συγκολλήσεων με πειράματα μηχανικών δοκιμών.